

Henna Matilainen

PILARI-SEINÄ-LIITOKSEN FEM-MALLINNUS

FEM-laskennan ja käsinlaskennan vertailu

Opinnäytetyö
Rakennustekniikan koulutusohjelma

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Henna Matilainen	Insinööri (AMK)	Toukokuu 2017
Opinnäytetyön nimi Pilari-seinä-liitoksen FEM-mallinnus FEM-laskennan ja käsinlaskennan vertailu		45 sivua 6 liitesivua
Toimeksiantaja Wise Group Finland Oy		
Ohjaaja Lehtori Juha Karvonen Lehtori Jani Pitkänen		
Tiivistelmä <p>Rakennukseen kohdistuvat kuormat johdetaan rakenteiden välisten liitosten kautta kantaville ja jäykistäville rakenteille ja sieltä edelleen alaspäin rakennuksen perustuksille ja edelleen maaperään. Rakenteiden välisiin pystysaumoihin syntyy leikkausvoimia vaakakuormista, kuten tuulikuormasta ja lisävaakavoimasta.</p> <p>Kantavien ja jäykistävien rakenteiden mitoittavat voimasuureet voidaan laskea FEM-analyysohjelmilla. FEM-laskentamallista saatujen tulosten tulee olla virheettömiä, jotta voidaan suunnitella turvallisia rakenteita. Wise Group Finland Oy:ssä FEM-ohjelmien käyttö on jokapäiväistä, ja ongelma on, että analyyseista saadut tulokset eivät aina vastaa kaikkien voimasuureiden osalta todellisuutta eli sitä mihin nykyisen käytännön nykyisillä hyväksi todetuilla käsinlaskentamenetelmillä on päästy. Erityisesti virheellisiä voimasuureita on saatu ETABS-ohjelmalla, kun mallinnettu kohde on ollut pilari-palkkirunkoinen rakennus, joka jäykistetään pilareiden väliin sijoitetuilla seinillä ja porrashuoneilla. Tämän vuoksi suunnittelussa on jouduttu täydentämään FEM-laskentaa käsinlaskennalla tai excel-sovellukseen tehdyillä laskentapohjilla.</p> <p>Työn tarkoituksena oli selvittää onko helposti löydettävissä mallinnusmenetelmä, jolla tulokset saadaan kaikilta osin täsmäämään.</p>		
Asiasanat FEM, jäykistys, pystykuorma, leikkausvoima		

Author (authors)	Degree	Time
Henna Matilainen	Bachelor of Engineering	May 2017
Thesis Title		
Column-wall-joint FEM modeling		45 pages
Comparison of FEM calculation and manual calculation		6 pages of appendices
Commissioned by		
Wise Group Finland Oy		
Supervisor		
Juha Karvonen, Senior Lecturer		
Jani Pitkänen, Senior Lecturer		
Abstract		
<p>The loads on the building are transferred through the joints between structures to load-bearing and stiffening structures and from there to the foundations and to the ground. It forms shear forces to vertical joints between the structure from horizontal loads, such as wind load and additional load forces.</p> <p>The dimensioning forces of load-bearing and stiffening structures can be calculated using FEM analysis programs. The results of the FEM analysis model must be faultless to design safe structures. In Wise Group Finland, the FEM programs are in daily use, and the problem is that the results of the analyses do not always correspond to reality. In particular, incorrect forces have been obtained when the modeled building has been a column-beam frame building, which is stiffened by walls and stairwells placed between the columns.</p> <p>The purpose of the thesis was to find out through different modeling methods if there is a solution to the problem. FEM analysis models were created in many different ways and their results were compared with the results of manual calculation. The thesis involved four different modeling methods for the wall-column joint. No modeling method produced a clear answer to the problem, and it can be said that the program producer should develop a solution.</p>		
Keywords		
FEM, stiffening, vertical load, shear force		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	RAKENTEIDEN KUORMAT	6
2.1	Oma paino	6
2.2	Hyötykuormat.....	6
2.3	Lumikuorma	7
2.4	Tuulikuorma	9
2.5	Lisävaakavoimat	14
2.6	Kuormayhdistelmät	15
3	RAKENNUKSEN JÄYKISTYS	18
3.1	Mastojäykistys	18
3.2	Levyjäykistys.....	20
3.3	Ristikkojäykistys.....	20
3.4	Yhdistelmäjäykistys	21
4	FEM-MALLINNUS	22
4.1	ETABS	23
4.2	Esimerkkikohteen mallinnus	23
5	TULOKSET	26
5.1	FEM-laskenta 1	27
5.2	Käsinlaskenta	29
5.3	FEM-laskenta 2.....	32
5.4	FEM-laskenta 3.....	34
5.5	FEM-laskenta 4.....	36
6	YHTEENVETO	38
	LÄHTEET	40

LIITTEET

Liite 1. ETABSin tuulikuormalaskelma

Liite 2. Tuulikuormalaskelma käsinlaskentaan

1 JOHDANTO

Rakennukseen kohdistuvat kuormat johdetaan rakenteiden välisten liitosten kautta kantaville ja jäykistäville rakenteille ja sieltä edelleen alaspäin rakennuksen perustuksille ja edelleen maaperään. Rakenteiden välisiin pystysaumoihin syntyy leikkausvoimia vaakakuormista, kuten tuulikuormasta ja lisävaakavoimasta.

Kantavien ja jäykistävien rakenteiden mitoittavat voimasuureet voidaan laskea FEM-analyysiohjelmilla. FEM-laskentamallista saatujen tulosten tulee olla virheettömiä, jotta voidaan suunnitella turvallisia rakenteita. Wise Group Finland Oy:ssä FEM-ohjelmien käyttö on jokapäiväistä, ja ongelma on, että analyyseista saadut tulokset eivät aina vastaa kaikkien voimasuureiden osalta todellisuutta eli sitä mihin nykyisen käytännön nykyisillä hyväksi todetuilla käsinlaskentamenetelmillä on päästy. Erityisesti virheellisiä voimasuureita on saatu ETABS-ohjelmalla, kun mallinnettu kohde on ollut pilari-palkkirunkoinen rakennus, joka jäykistetään pilareiden väliin sijoitetuilla seinillä ja porrashuoneilla. Suunnittelussa on siksi jouduttu täydentämään FEM-laskentaa käsinlaskennalla tai excel-sovellukseen tehdyillä laskentapohjilla. Työn tarkoituksena oli selvittää onko helposti löydettävissä mallinusmenetelmä, jolla tulokset saadaan kaikilta osin täsmäämään.

Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta sekä laskentaosuudesta. Teoriaosuudessa käsitellään rakennukseen vaikuttavia kuormia ja niiden laskentaperiaatteita. Lisäksi teoriaosuuteen on koottu perusteet rakenneosien jäykistämisestä ja rakennusrungon kokonaisjäykistämisestä. Laskentaosiossa käydään läpi esimerkiksi FEM-laskentamalleista saatuja tuloksia sekä käsinlaskenta. Tehtyjen mallien ja käsinlaskennan tuloksia vertailemalla voidaan todeta löytyykö ongelmaan ratkaisu tässä työssä vai jääkö se esimerkiksi ohjelman mahdollisen päivityksen varaan.

2 RAKENTEIDEN KUORMAT

2.1 Oma paino

Oma paino on pysyvää ja kiinteää kuormaa. Rakennusosan oma paino lasketaan tilavuuspainojen ominaisarvojen ja nimellismittojen perusteella. Kantavat ja ei-kantavat rakennusosat sekä kiinteät laitteet lasketaan rakennuksen omaan painoon. [1, s. 63.]

2.2 Hyötykuormat

Rakennuksen pystysuuntaiset hyötykuormat aiheutuvat tilojen käytöstä. Hyötykuormiin sisältyy henkilö- ja tavarakuormat sekä ajoneuvokuormat. Siirrettävistä väliseinistä aiheutuvat kuormat luetaan myös hyötykuormiksi. Odotettavissa olevat harvinaiset tapahtumat on myös huomioitava, kuten henkilöiden kokoontuminen ja huonekalujen kasautuminen. [1, s. 64]

Rakennusten asuin-, kokoontumis-, myymälä- ja toimistotilat jaetaan niiden käyttötarkoituksen mukaisesti käyttöluokkiin taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Käyttöluokat [2, s. 30]

Luokka	Käyttötarkoitus	Esimerkki
A	Asuin- ja majoitustilat	Asuinrakennusten huoneet, sairaaloiden potilas- ja toimenpidehuoneet, hotellien ja retkeilymajojen makuuhuoneet, keittiöt ja WC:t.
B	Toimistotilat	
C	Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua (poikkeuksena luokkiin A, B, ja D kuuluvat tilat) ¹⁾	C1: Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat. C2: Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentosalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat. C3: Tilat, joissa ei ole liikkumista rajoittavia esteitä, esim. museo- ja näyttelytilat, julkisten rakennusten ja toimistorakennusten, hotellien ja sairaaloiden eteistilat, asemahallit. C4: Liikuntatilat, esim. tanssisalit, voimistelusalit ja näyttämöt. C5: Tilat, joihin voi syntyä tungosta esim. yleisötapahtumien rakennuksissa; tällaisia ovat konserttisalit, urheiluhallit mukaan luettuina katsomot, terassit ja eteistilat sekä rautatielaiturit.
D	Myymälatilat	D1: Tavallisten vähittäiskauppojen tilat. D2: Tavaratalojen tilat.
¹⁾ On syytä kiinnittää huomiota kohtaan 6.3.1.1(2), erityisesti luokkien C4 ja C5 osalta. Standardissa EN 1990 esitetään, milloin dynaamiset vaikutukset on tarpeen ottaa huomioon. Luokkaa E koskevat tiedot ovat taulukossa 6.3.		
HUOM. 1 Aiotusta käyttötarkoituksesta riippuen tilat, jotka todennäköisesti sijoitettaisiin luokkaan C2, C3 tai C4, voidaan tilaajan päätöksellä tai kansallisen liitteen perusteella sijoittaa luokkaan C5.		
HUOM. 2 Kansallisessa liitteessä luokat A, B, C1...C5, D1 ja D2 voidaan jakaa alaluokkiin.		
HUOM. 3 Varasto- ja teollisuustiloja tarkastellaan kohdassa 6.3.2.		

Taulukon 1 mukaisesti käyttöluokkiin määritellyt tilat mitoitetaan taulukossa 2 esitetyillä ominaisarvoilla q_k (tasan jakautunut kuorma) ja Q_k (pistekuorma). Tarvittaessa voidaan käyttää vähimmäiskuormia suurempiakin arvoja.

Taulukko 2. Rakennusten välipohjien, parvekkeiden ja portaiden hyötykuormat [3, s. 5]

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]			Q_k [kN] (portaat suluissa)
	Välipohjat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0*)
Luokka B Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua				
— C1	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
— C2	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
— C3	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
— C4	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
— C5	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D Myymälätilat				
— D1	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
— D2	5,0	5,0	5,0	7,0 (2,0)
*Asunnon sisäiset portaat $Q_k = 1,5$ kN				

2.3 Lumikuorma

Lumikuorma luokitellaan muuttuvaksi, kiinteäksi kuormaksi. Katon lumikuorma s määritetään kaavan 1 mukaan. [1, s. 94.]

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (1)$$

jossa	μ_i	lumikuorman muotokerroin
	C_e	tuulensuojaisuuskerroin
	C_t	lämpökerroin
	s_k	maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [kN/m ²]

Lumikuorman muotokerroin μ_i määritetään taulukon 3 mukaan ja tuulensuojaisuskerroin C_e taulukon 4 mukaan. Lämpökertoimena C_t käytetään tavallisesti arvoa 1,0. Maassa olevan ominaislumikuorman s_k arvo määritetään kuvasta 1.

Taulukko 3. Lumikuorman muotokertoimet [4, s. 30]

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	–

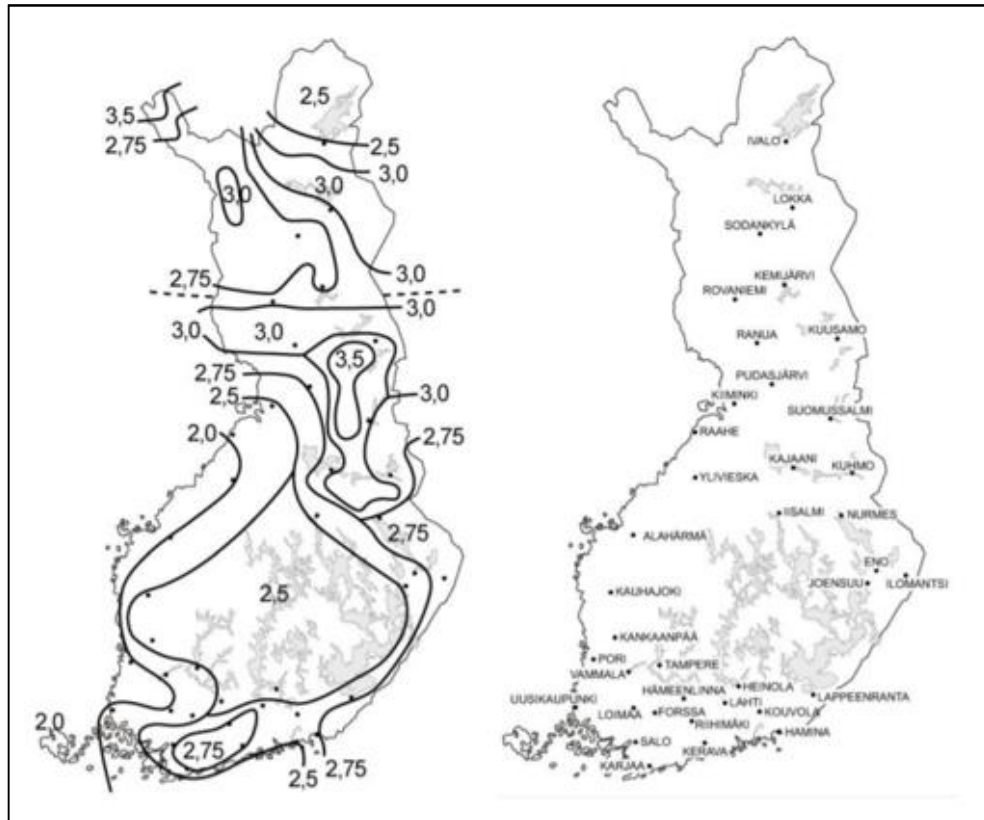
Taulukko 4. Tuulensuojaisuskerroimen arvot [3, s. 17]

Maastotyyppi	C_e
Tuulinen	0,8 (1,0, mikäli lyhyempi sivumitta > 50 m)
Normaali	1,0
Suojainen	1,2

Tuulinen maasto: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.

Normaali maasto: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.

Suojainen maasto: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.



Kuva 1. Lumen ominaisarvot maan pinnalla [3, s. 15]

2.4 Tuulikuorma

Tuulikuorma luokitellaan ajan mukana vaihtelevaksi, muuttuvaksi kiinteäksi kuormaksi. Tuulikuormista aiheutuu painetta umpinaisten rakenteiden ulkopintoihin sekä ulkopinnan huokoisuuden vuoksi myös välillisesti sisäpintoihin. [5, s. 30.]

Tuulen paine muodostaa rakenteen tai yksittäisten verhouksien pintaan koh-tisuoria voimia. Tuulikuorman vaikuttaessa suuriin pintoihin myös pinnan suuntaiset kitkavoimat voivat olla merkittäviä. [5, s. 30.]

Tuulennopeus ja nopeuspaine lasketaan keskimääräisen ja vaihtelevan kom-ponentin summana. Tuulennopeuden modifioituun perusarvoon v_m vaikuttavat tuulennopeuden perusarvo v_b ja tuulen nopeusprofiili. Tuulen nopeusprofiili mää-ritetään maaston rosoisuuden ja pinnanmuodostuksen perusteella. [5, s. 32.]

Tuulennopeuden perusarvo v_b lasketaan kaavasta 2.

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (2)$$

jossa	c_{dir}	suuntakerroin, suositusarvo 1,0
	c_{season}	vuodenaikakerroin, suositusarvo 1,0
	$v_{b,0}$	tuulennopeuden modifioimaton perusarvo 21 m/s

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo $v_m(z)$ korkeudella z maaston yläpuolella saadaan kaavasta 3.

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (3)$$

jossa	$c_r(z)$	rosoisuuskerroin, lasketaan kaavasta 4
	$c_0(z)$	pinnanmuotokerroin, arvo 1,0

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

jossa	z_0	rosoisuusmitta
	k_r	maastokerroin, joka riippuu rosoisuusmitasta z_0 lasketaan kaavasta 5

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (5)$$

jossa	$z_{0,II}$	0,05 m (maastoluokka II, taulukko 5)
-------	------------	--------------------------------------

Taulukko 5. Maastoluokat ja maastoparametrit [5, s. 36]

Maastoluokka	z_0 m	z_{min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10
HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.		

Korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine $q_p(z)$, joka sisältää tuulennopeuden modifioitun perusarvon ja lyhytaikaisten nopeusvaihteluiden vaikutukset määritetään kaavasta 6. [5, s. 40.]

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (6)$$

jossa ρ ilmantiheys, suositusarvo $1,25 \text{ kg/m}^3$
 $I_v(z)$ tuulenpuuskan intensiteetti korkeudella z lasketaan kaavasta 7

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (7)$$

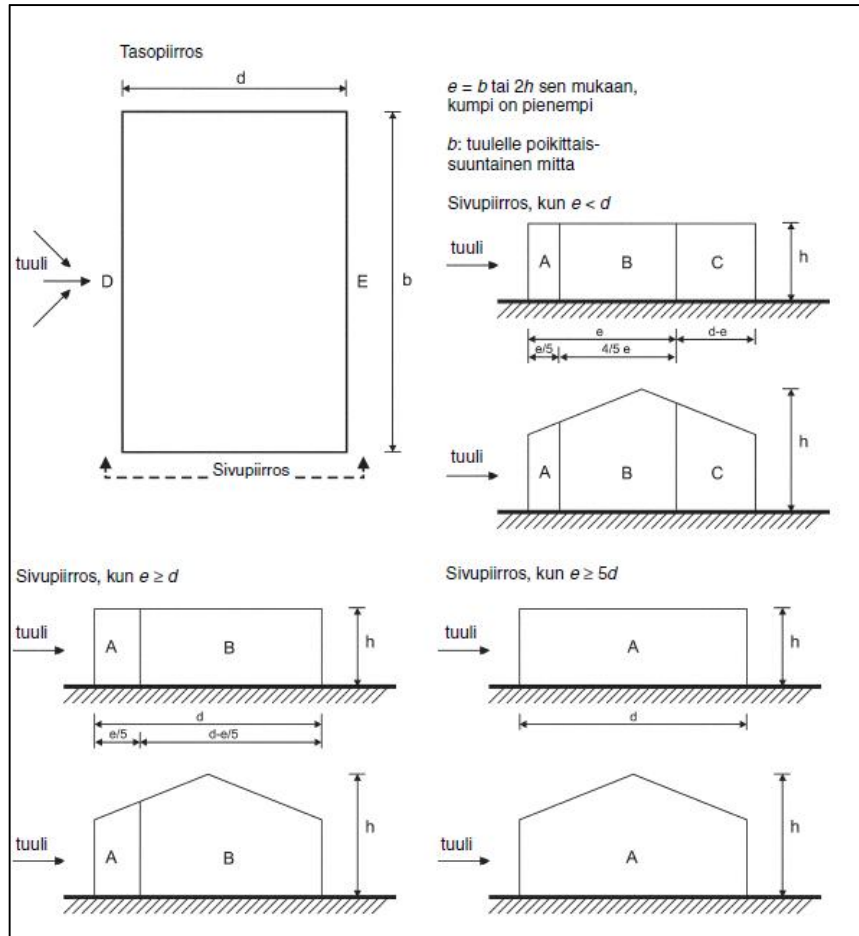
jossa k_l pyörteisyyskerroin, suositusarvo 1,0

Rakenteeseen tai rakenneosaan vaikuttavat tuulikuormat lasketaan pintapaineiden perusteella ja painekertoimia (c_p) käyttäen [1, s. 135]. Kaavasta 8 saadaan laskettua rakennuksen ulkopintoihin vaikuttava tuulen paine w_e [kN/m^2].

$$w_e = q_p(z) * c_{pe} \quad (8)$$

jossa $q_p(z)$ puuskanopeuspaine

Painekertoimien arvot löytyvät taulukosta 6 pystyseiniä eri vyöhykkeille. Vyöhykkeet on määritelty kuvassa 2.



Kuva 2. Pystyseiniä koskeva vyöhykekaavio [5, s. 62]

Taulukko 6. Ulkopuolisen paineen kertoimet [5, s. 62]

Vyöhyke	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Kaavasta 9 saadaan rakennuksen sisäpintoihin vaikuttava tuulen paine w_i [kN/m²].

$$w_i = q_p(z) * c_{pi} \quad (9)$$

jossa	$q_p(z)$	puuskanopeuspaine
	c_{pi}	sisäisen paineen painekerroin, määritetään RIL 201-1-2011 kohdan 7.2.9 mukaan

Rakennukseen vaikuttava ulkopuolinen kuorma $F_{w,e}$ lasketaan kaavasta 10, sisäpuolinen kuorma määritetään kaavasta 11 ja kitkakuorma kaavasta 12.

$$F_{w,e} = c_s c_d * \sum_{pinnat} w_e * A_{ref} \quad (10)$$

jossa	w_e	ulkopintoihin vaikuttava tuulen paine
	$c_s c_d$	rakennekerroin
	A_{ref}	vaikutusala

$$F_{w,i} = \sum_{pinnat} w_i * A_{ref} \quad (11)$$

jossa	w_i	sisäpintoihin vaikuttava tuulen paine
	A_{ref}	vaikutusala

$$F_{fr} = c_{fr} * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (12)$$

jossa	c_{fr}	kitkakerroin, määritetään RIL 201-1-2011 kohdan 7.5 mukaan
	A_{ref}	vaikutusala

Kokonaistuulivoiman F_w määrittäminen tapahtuu kaavan 13 mukaisesti. Kokonaistuulivoima lasketaan ulkopuolisen ja sisäpuolisen kuormaresultantin vektorisummana. Laskentaan sisällytetään tarvittaessa myös kitkavaikutukset.

$$F_w = F_{w,e} + F_{w,i} + F_{fr} \quad (13)$$

jossa	$F_{w,e}$	rakennuksen ulkopintaan vaikuttava painekuorma
	$F_{w,i}$	rakennuksen sisäpintaan vaikuttava painekuorma
	F_{fr}	kitkakuorma

2.5 Lisävaakavoimat

Rakennuksen vakavuuslaskelmissa tulee ottaa huomioon mahdollisten mittapoikkeamien ja kuormien sijainnin epäedullisten vaikutusten aiheuttamat lisävaakavoimat. Mittaepätarkkuudet huomioidaan murtorajatiloiissa normaalisti vallitsevissa tilanteissa ja myös onnettomuusmitoitustilanteissa. [6, s. 54.]

Epätarkkuudet voidaan laskea vinouden θ_i avulla kaavasta 14.

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (14)$$

jossa	θ_0	perusarvo, suositusarvo 1/200
	α_h	pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin, lasketaan kaavasta 15
	α_m	rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin, lasketaan kaavasta 16

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}}; \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1 \quad (15)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (16)$$

jossa	l	rakennuksen korkeus [m]
	m	jäykistysjärjestelmän vaakavoimaan vaikuttavien pystyrakennusosien määrä

RIL 201-1-2011 esittää yksinkertaistetun tavan lisävaakavoimien laskentaan, jota voi käyttää, kun ei suoriteta tarkempia tarkasteluja. Rakennukseen oletetaan vaikuttavan kaavojen 17 ja 18 mukaiset lisävaakavoimat.

Rakennuksen lyhyemmässä suunnassa

$$H_{dt} = \frac{N_d}{150} \quad (17)$$

Rakennuksen pidemmässä suunnassa

$$= \frac{b}{l} * \frac{N_d}{150} \geq \frac{N_d}{250} \quad (18)$$

jossa	H_{dt} ja H_{dl}	lisävaakavoiman laskenta-arvot
	N_d	ko. lisävaakavoiman aiheuttavan pystykuorman laskenta-arvo
	b	rakennuksen leveys
	l	rakennuksen pituus

Kuormien H_{dt} ja H_{dl} ei oleteta esiintyvän samanaikaisesti. Suunta, jossa lisävaakavoima vaikuttaa, valitaan siten, että rakennuksen stabiliteetin kannalta muodostuu määräävä vaikutus. [1, s. 74.]

2.6 Kuormayhdistelmät

Rakenne tulee suunnitella ja toteuttaa niin, että se kestää kaikki esiintyvät kuormat ja vaikutukset. Rakenteiden kestävyys mitoitetaan murtorajatilassa (STR). Mitoituksessa käytettävissä kuormayhdistelmissä huomioidaan luotettavuuden tasoluokitus ja siihen liittyvät seuraamusluokat kuormakertoimella K_{FI} . [1, s.23–25.] Seuraamusluokat ja niiden määrittelyt ovat esitetty taulukossa 7 ja kuormakertoimen arvot taulukossa 8.

Taulukko 7. Seuraamusluokkien määrittely rakennuksille ja rakenteille [7, s. 23]

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai hyvin suurten</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten - yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikeyrakennukset - konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot Raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esimerkiksi korkeat tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä erityisesti hienorakeisten maalajien alueilla.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai merkittävien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai pienten tai merkityksettömien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset ²⁾ rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä ³⁾ kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m ² tai suurin jänneväli enintään 6 metriä. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten - matalalla olevat terassit ja alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.

pienehköt rakennusrungosta erilliset välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena.

kellarikerrokset mukaan luettuina.

tilapäisenä oleskeluna pidetään päivittäistä käymistä rakennuksessa, mutta ei siellä pidempään viipymistä.

Taulukko 8. Luotettavuusluokat ja kuormakerroin [1, s. 24]

Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	Kuormakerroin K_{FI}
CC3	RC3	1,1
CC2	RC2	1,0
CC1	RC1	0,9

Rakenteen tai rakenneosan kestävyysmitoituksessa käytettävät kuormitusyhdistelmät saadaan kaavoista 19 ja 20. Kaavoista käytetään sitä, joka antaa määrävän vaikutuksen. [1, s. 38.] Kaavassa 19 käytettävä muuttuvan kuorman yhdistelykerroin $\psi_{0,i}$ määritelmät löytyvät taulukosta 9 ja kertoimien arvot taulukosta 10.

$$\left\{ 1,15K_{FI} \right\}_{0,9} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q \quad (19)$$

$$\left\{ 1,35K_{FI} \right\}_{0,9} = \sum_{j \geq 1} G_k \quad (20)$$

Taulukko 9. Yhdistelykertoimien määritelmät [1, s. 30]

ψ_0	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin mm. ominaisyhdistelmässä (murtorajatila)
ψ_1	muuttuvan kuorman tavallinen yhdistelykerroin (onnettomuuskuormia sisältävä murtorajatila)
ψ_2	muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin (onnettomuuskuormia sisältävä murtorajatila)

Taulukko 10. Kertoimien ψ arvot rakennuksille [7, s. 18]

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6**)
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3**)
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)*) kun			
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ***)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
*) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. **) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ ***) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

3 RAKENNUKSEN JÄYKISTYS

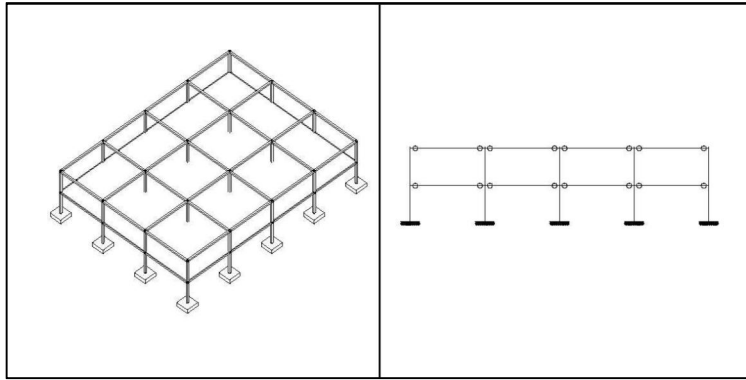
Jäykistysjärjestelmän tarkoituksena on siirtää rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat hallitusti ja luotettavasti perustuksiin ja maaperään. Rakennuksen jäykistystä suunniteltaessa on otettava huomioon, että jäykistysjärjestelmien osien kapasiteetti on riittävä kaikissa kuormitustapauksissa. Suunnitteluvaiheessa on myös huomioitava rakennuksen staattinen tasapaino sekä rakennuksen muodonmuutosten ja siirtymien pysyminen sallituissa rajoissa. [8, s. 2.]

Kaikissa jäykistystavoissa toimintaperiaate on se, että vaakakuormat siirtyvät jäykistäville pystyrakenteille tasojen vaakarakenteiden kautta. Jäykistävät pystyrakenteet keräävät kuormaa jäykkyyksiensä suhteessa ja mitoitettaessa jäykistysrakenteita, on niiden todelliset jäykkyydet tiedettävä riittävällä tarkkuudella. [8, s. 2.]

3.1 Mastojäykistys

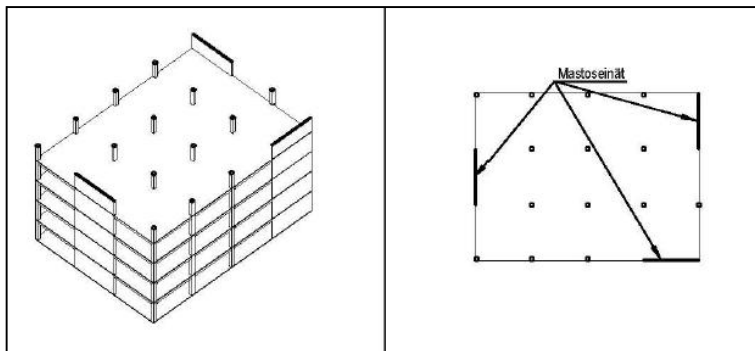
Mastojäykistyksessä jäykistävien rakenteiden toimintaperiaate on sama kuin alapäästään jäykästi kiinnitettyjen ulokepilarien. Rakennuksen tulee olla jäykkä kaikissa suunnissa ja tällöin myös tasojen on oltava jäykkiä. Tasojen vaakarakenteet siirtävät vaakavoimista aiheutuvat rasitukset jäykistäville rakenteille ja rakennuksen rungon muut pystyrakenteet voidaan toteuttaa edullisilla ja helposti toteutettavilla nivelliitoksilla. Mastojäykistyksiä on kolmea erilaista tyyppiä: mastopilarijäykistys, mastoseinäjäykistys ja jäykistäminen jäykistystornilla. [8, s. 13.]

Mastopilarit kiinnitetään jäykästi alapäästään perustuksiin (kuva 3). Vaakakuormat siirtyvät tällöin pilareille ulkoseinärakenteiden ja tasojen välityksellä. Kyseinen jäykistystavan käyttö soveltuu vain mataliin 1–3 kerroksisiin rakennuksiin. [8, s. 14]



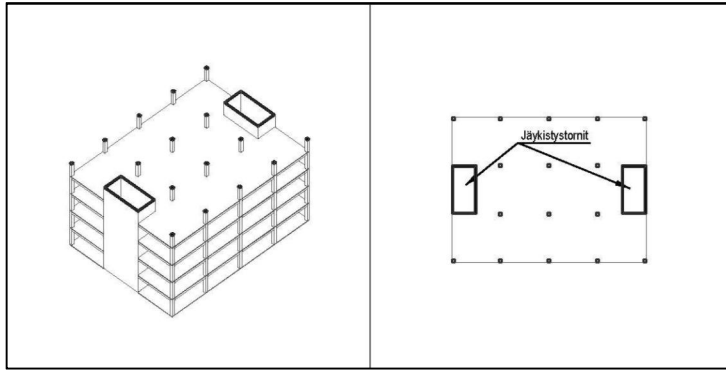
Kuva 3. Mastopilarijäykistyksen periaate [8, s. 14]

Mastoseinäjäykistyksen periaate on esitetty kuvassa 4. Mastoseinäjäykistyksessä seinien sijoittelussa on huomioitava, että niille saadaan riittävästi pystykuormia, jotta seinärakenteeseen ei tule vetovoimia. Mastoseiniin mahdollisesti tehtävät pystysuuntaiset saumat on muistettava mitoittaa niissä vaikuttaville pystysuuntaisille leikkausvoimille, jotta seinän osat saadaan toimimaan monoliittisesti yhdessä. Mastoseinät on pyrittävä sijoittaminen rakennukseen mahdollisimman symmetrisesti. Mastoseinäjäykistys sopii myös korkeisiin rakennuksiin. [8, s. 16.]



Kuva 4. Mastoseinäjäykistyksen periaate [8, s.15]

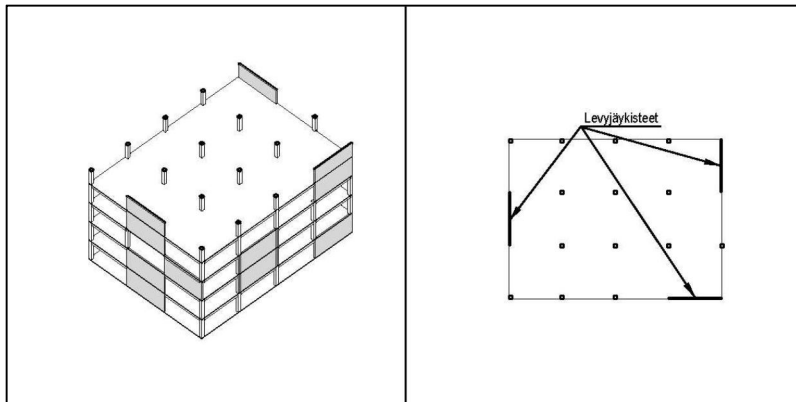
Jäykistystornien toimintatapa on samanlainen kuin mastoseinillä, eli ne toimivat ulokepilareina perustuksista. Jäykistystorneina toimivat hissikuilut ja porrashuoneet (kuva 5). Porrashuoneiden sijoitus pilareiden väliin ja kiinnittäminen pilareihin on suotavaa rakennuksen stabiliteetin kannalta. Myös jäykistystorneja käytettäessä on tärkeää mitoittaa eri elementtien väliset liitokset niissä vaikuttaville todellisille voimille. [9; 8, s. 17.]



Kuva 5. Periaate käytettäessä jäykistystornia [8, s.18]

3.2 Levyjäykistys

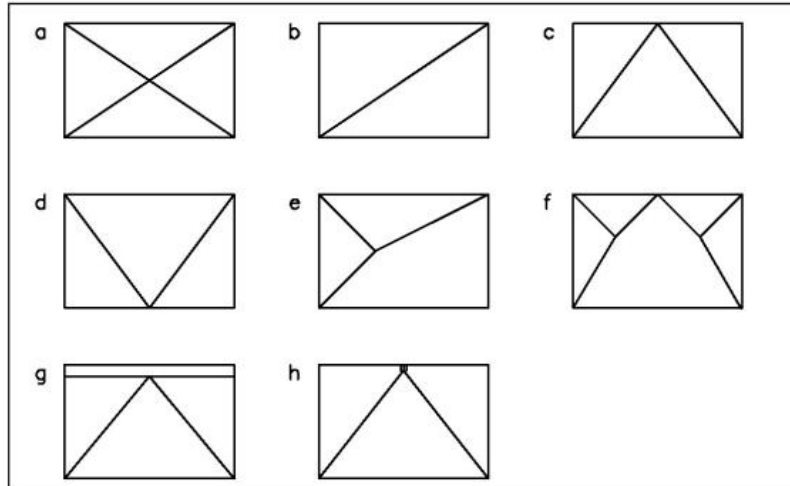
Levyjäykistyksessä jäykistävänä rakenteena toimii rungon aukkokohtaisissa sijaitsevat levyt (kuva 6). Vaakakuormista aiheutuvat voimat siirtyvät levyjen leikkausvoimana rakenteille ja alaspäin aina perustuksiin asti. [8, s. 20.]



Kuva 6. Levyjäykistys periaate [8, s. 20]

3.3 Ristikkojäykistys

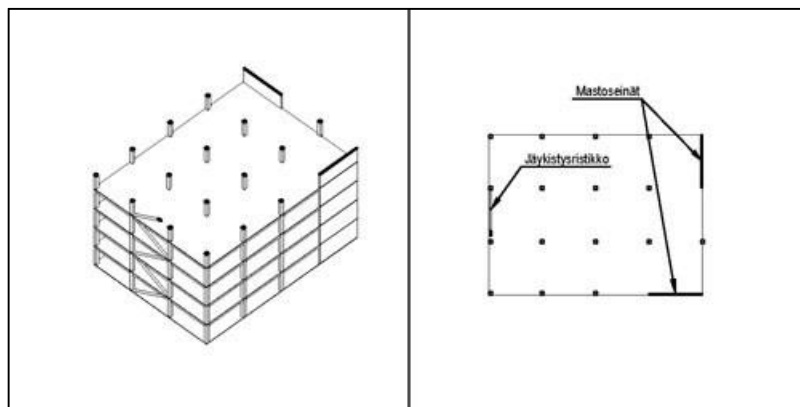
Pilari-palkkirunkoisessa rakennuksessa voidaan käyttää myös ristikkojäykistystä levyjäykistys sijaan. Ristikkojäykistys toimii levyjäykistys tapaan, levyjäykisteet korvataan veto- ja/tai puristussauvoilla (kuva 7). [8, s. 21.]



Kuva 7. Erilaisia ristikkoratkaisuja [8, s. 22]

3.4 Yhdistelmäjäykistys

Edellä kerrottujen jäykistystapojen lisäksi voidaan käyttää kyseisten jäykistystapojen yhdistelmiä. Mastoseinä-/kuilujäykistys yhdistettynä ristikkojäykistykseen on yksi yleisimpiä yhdistelmäjäykistyksiä (kuva 8). Eri jäykistysjärjestelmien jäykkyydet ovat erilaisia ja se on huomioitava yhdistelmäjäykistystä käytettäessä, jotta vaakakuormat jaetaan oikein jäykistysten kesken. [8, s. 23]



Kuva 8. Yhdistetty mastoseinä- ja ristikkojäykistys [8, s. 25]

4 FEM-MALLINNUS

FEM-menetelmän lyhenne tulee elementtimenetelmän englanninkielisestä nimestä Finite Element Method. Toinen usein käytetty lyhenne on FEA, joka muodostuu sanoista Finite Element Analysis, joka tarkoittaa elementtimenetelmällä tehtävää laskentaa. Elementtimenetelmä on osoittautunut ehdottomasti tehokkaimmaksi lujuuslaskennan ratkaisumenetelmäksi. Lujuuslaskennassa on tarkoitus ratkaista rakenteeseen kuormitusten aiheuttamat siirtymät, muodonmuutokset ja jännitykset, kun rakenteen tuenta tunnetaan. [11, s. 1.]

FEM-ohjelmissa on käytössä useampia analysointitapoja, kuten staattinen analyysi, dynaaminen analyysi, lineaarinen analyysi ja epälineaarinen analyysi. Staattinen analyysi on käytetyin analysointitapa ja siinä oletetaan, että kuormitukset ja niiden aiheuttamat jännitykset ja siirtymät ovat ajasta riippumattomia. Dynaamisessa analyysissä taas jännitykset, siirtymät ja kiihtyvyydet ovat ajasta riippuvia ja tämän takia se on staattista analyysia vaativampi tehtävä. Lineaarisessa analyysissä rakenteen kuormitusten ja niiden aiheuttamien siirtymien ja jännitysten välinen yhteys on lineaarinen. Sekä staattinen, että dynaaminen analyysi voi olla lineaarinen. Epälineaarisessa staattisessa analyysissä käytetään ns. kuormituksen askellusta, jotta voidaan selvittää kuormitusten lopullisia arvoja vastaavat jännitykset ja siirtymät. Tällöin kuormitus lisätään riittävän pieninä askeleina ja jokaisella kuormitusaskeleella etsitään rakenteen tasapainotila iteroimalla. Epälineaarisessa dynaamisessa analyysissä aika-askellukseen on sisällytettävä tasapainoiterointi, jotta ratkaisusta tulisi riittävän tarkka kullakin aika-askeleella. [12, s. 1–2.]

Laskettaessa rakennuksen mitoittavia voimasuureita FEM-ohjelmilla mallintamalla, on huolehdittava, että erilaisten rakenteiden ominaisuudet sekä liittymät rakenteiden välillä on mallinnettu mahdollisimman oikein vastaamaan todellisuutta, sillä muuten tulokset voivat olla virheellisiä eivätkä vastaa rakenteen toimintaa. [8, s. 2.]

FEM-mallinnuksen oikeellisuus korostuu erityisesti korkeissa ja monimutkaisissa rakennuksissa, joissa pientenkin mallinnusvirheiden vaikutus voi kertaantua ja

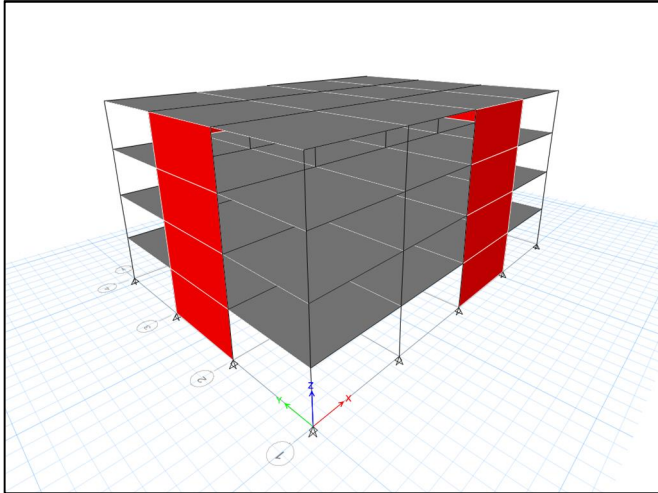
voimat jakaantuvat virheellisesti. Mutta 3D-laskentamallin hyöty on että, siitä voidaan paikallistaa sellaisia rasisuskeräytymiä, joita ei yksinkertaistetuilla menetelmillä välttämättä huomata. [8, s. 3.]

4.1 ETABS

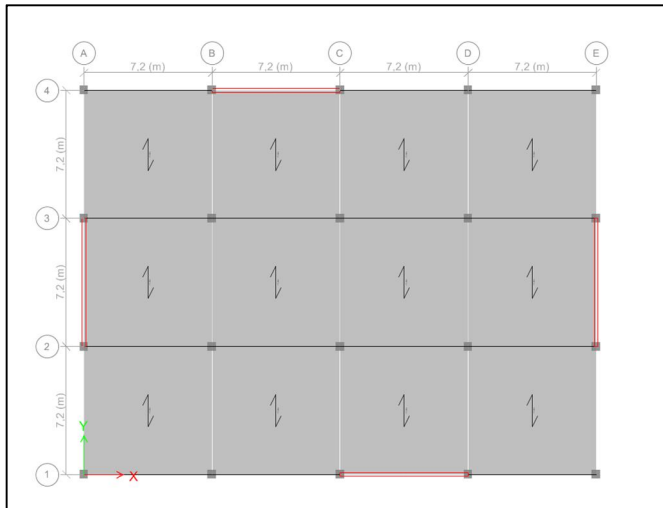
Tässä työssä käytetty FEM-ohjelma on ETABS. Se on amerikkalaisen yrityksen Computers and Structures, Inc. tuottama sovellus rakennuksien suunnitteluun ja rakenteellisiin analyysihin. ETABS:ssa on tehokas graafinen käyttöliittymä, joka on yhdistetty mallintamiseen, analysointiin, suunnitteluun ja yksityiskohtaisiin nettelytapoihin, jotka kaikki on integroitu yhteiseen tietokantaan. Yksinkertaiset rakenteet ovat nopeita ja helppoja suunnitella tavanomaisilla ohjelmilla. Sen sijaan ETABS:lla pystyy suunnittelemaan monimutkaisempia rakennemalleja, mukaan lukien laaja valikoima epälineaarisia käyttäytymismalleja. [10, s. 9.]

4.2 Esimerkkikohteen mallinnus

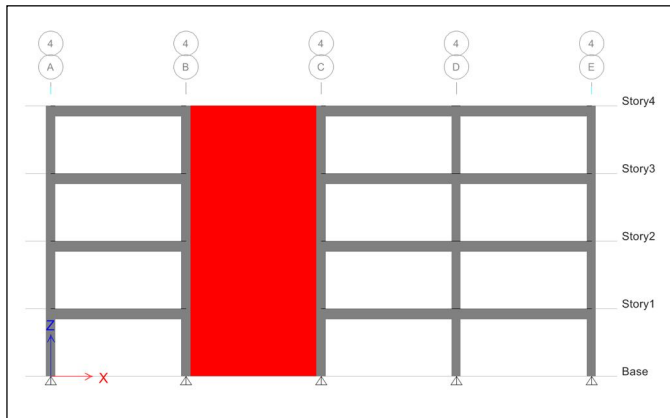
Esimerkkikohteenä mallinnettiin pilari-palkkirunkoinen rakennus, joka on jäykistetty pilareiden väliin sijoitetuilla seinillä. Ontelolaattarakenteiset tasot toimivat kuormaa jakavina jäykkinä vaakarakenteina. Kyseinen rakennejärjestelmä on yleinen esimerkiksi toimisto- ja liikerakentamisessa. Rakennus on 4 kerroksinen ja kerroskorkeus on 3,6 m, jolloin rakennuksen kokonaiskorkeus on 14,4 m. Rakennuksen pituus on 28,8 m ja leveys 21,6m. Esimerkissä tarkasteltava rakennus on esitetty kuvissa 9-11.



Kuva 9. FEM-ohjelmalla luotu 3D-malli rakennuksesta



Kuva 10. Pohjakuva FEM-mallista



Kuva 11. Sivunäkymä linjalta 4

Rakennuksen pilareiden koko 480 x 480 mm ja ne ovat mallinnettu kerroksen korkuisina, palkit ovat yksiaukkoisia kooltaan 580 x 480 mm, välipohjat ja yläpohjat ovat 320 mm paksuja ontelolaattoja ja seinät ovat kerroksen korkuisia ja 200 mm paksuja. Pilarit ja palkit mallinnettiin sauvaelementteinä ja niiden liitokset nivelinä. Seinät sekä ontelolaatat mallinnettiin levyelementteinä. FEM-elementtiverkon maksimi koko on 0,5 m. Tätä mallia käytetään jokaisessa laskennassa, ainoastaan pilarin ja seinän välisen liitoksen mallinnustapa vaihtuu.

Rakennukseen vaikuttavat kuormat

Omat painot

ETABS laskee rakenteiden omat painot automaattisesti materiaalille määritetyn tilavuuspainon ja rakenteen mittojen avulla. Laskennassa betonin tilavuuspainona on käytetty $24,6 \text{ kN/m}^3$ (2500 kg/m^3). Ensimmäisen, toisen ja kolmannen kerroksen välipohjiin on lisätty muu pysyvä kuorma (dead2) $0,5 \text{ kN/m}^2$.

Lumikuorma

ETABSiin syötetyn lumikuorman arvo on $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Hyötykuorma

Hyötykuorman arvo luokan B mukaan on $3,0 \text{ kN/m}^2$ (sisältää kevyet väliseinät $0,5 \text{ kN/m}^2$). Hyötykuorma vaikuttaa ensimmäisen, toisen ja kolmannen kerroksen välipohjissa.

Kuormitusyhdistelmät

ETABSiin on valmiiksi rakennettu kuormitusyhdistelmät, jossa seuraamusluokkana on käytetty CC3:a, jolloin kuormakerroin $K_{FI} = 1,1$. Todellisuudessa kyseinen rakennus kuuluu seuraamusluokkaan CC2 ja kuormakertoimen K_{FI} arvo olisi 1,0. Laskennassa käytetään ohjelmaan valmiiksi sisään rakennettuja kuormitusyhdistelmiä.

Lisävaakavoima

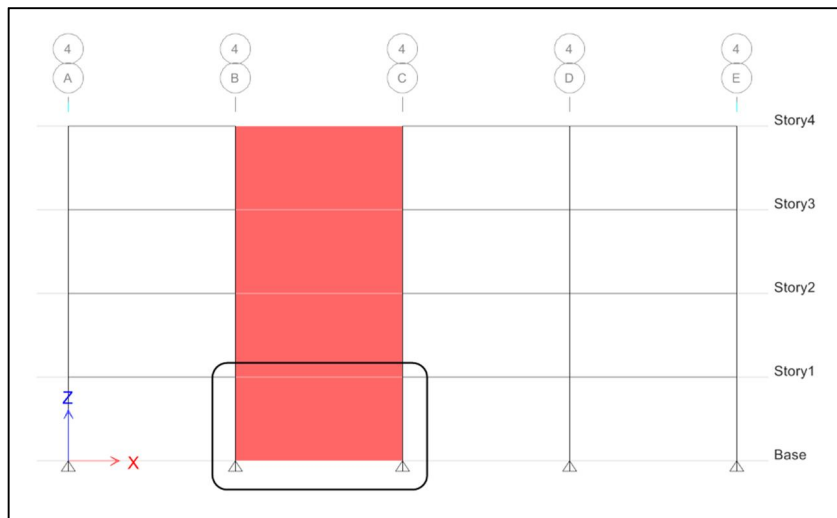
Ohjelma huomioi myös lisävaakavoiman laskennassa ja sen arvo on $H_{Ed} = N_{Ed}/400$.

Tuulikuorma

Etabs laskee tuulikuorman automaattisesti eurokoodin mukaisesti. Liitteestä 1 löytyy ohjelman laskema tuulikuorma kerroksittain x-suunnassa, sekä tuulikuorman laskemiseen käytettävät arvot.

5 TULOKSET

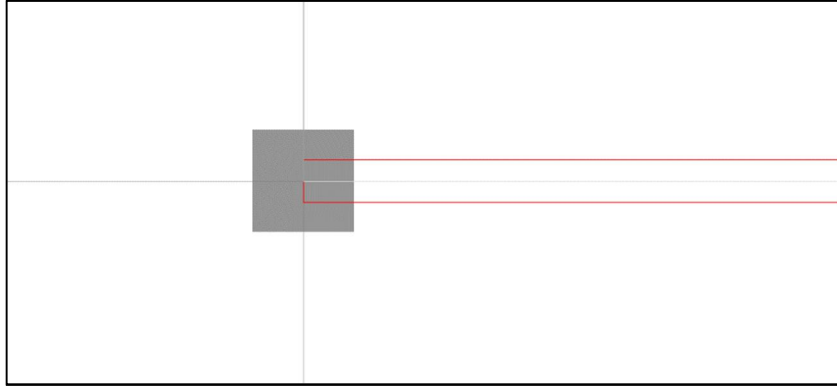
Tässä osiossa käydään läpi FEM-laskentamallien mallinnustavat ja laskennasta saadut tulokset sekä käsinlaskennasta saadut tulokset. Laskennassa käsitellään moduulilinjalla 4 sijaitsevan alimman kerroksen moduulivälin B-C seinä-pilari-yhdistelmän voimasuureita (kuva 10). Tarkasteltavat voimasuureet ovat pilarin normaalivoima sekä seinän ja pilarin välisen pystysauman leikkausvoima.



Kuva 12. Tarkasteltava pilari-seinä yhdistelmä

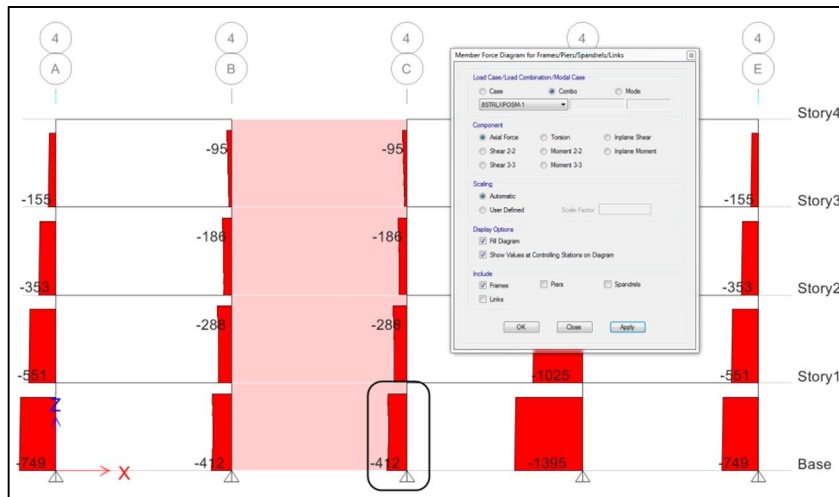
5.1 FEM-laskenta 1

Ensimmäisessä vaiheessa pilarin ja seinän liitos mallinnetaan niin, että seinä on kiinni pilarissa koko vahvuudeltaan (kuva 13).

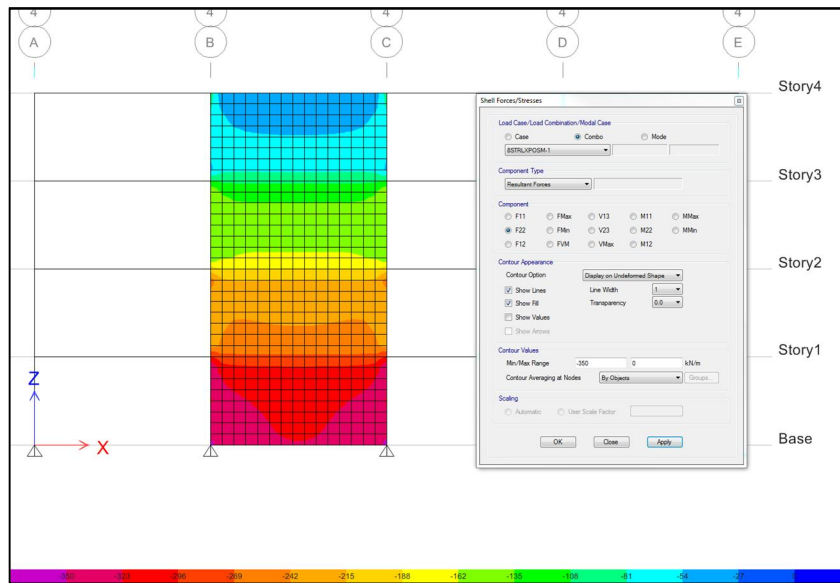


Kuva 13. Pilarin ja seinän välinen liitos

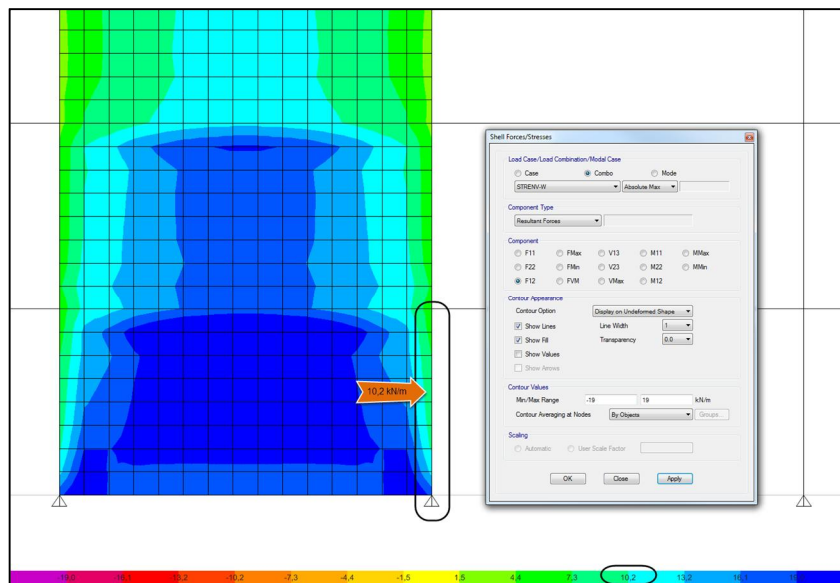
Kuvassa 14 on esitetty pilarin normaalivoimarasituskuva. Kuvasta nähdään tarkasteltavalle pilarille tuleva kuorma, joka on 412 kN. Kuvassa 15 on esitetty seinän puristusrasituskuva. Seinän ja pilarin välisen pystysauman leikkausvoimana arvo on keskimäärin 10,2 kN/m, joka nähdään kuvasta 16.



Kuva 14. Pilarin normaalivoima



Kuva 15. Seinän maksimipuristus



Kuva 16. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima

5.2 Käsinlaskenta

Tarkastelussa vertailua varten tehtävä käsinlaskenta tehdään käyttäen seuraavia lähtötietoja.

Omat painot

Ontelolaatat (320 mm)	$g_k = 4,2 \text{ kN/m}^2$
Muut pysyvät kuormat (tasoite)	$g_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$
Pilarit (480 x 480 mm)	$g_k = 5,8 \text{ kN/m}$
Palkit (580 x 480 mm)	$g_k = 7,0 \text{ kN/m}$
Seinät ($b = 200 \text{ mm}$, $h = 3,6 \text{ m}$)	$g_k = 17,7 \text{ kN/m}$

Tuulikuorma lasketaan kohdan 2.4 mukaan. Liitteestä 2 löytyy Excel-laskentapohjalla lasketut tuulenpaineet ($w_e + w_i$). Katon tasolla vaikuttavan tuulenpaineen arvoksi saatiin $0,55 \text{ kN/m}^2$. Kolmannen kerroksen tasolla vaikuttava tuulenpaine on $0,50 \text{ kN/m}^2$, toisen kerroksen tasolla vaikuttava tuulenpaine on $0,43 \text{ kN/m}^2$ ja ensimmäisen kerroksen tasolla vaikuttava tuulenpaine on $0,37 \text{ kN/m}^2$. Näin ollen kokonaistuulivoiman F_{wk} arvoksi saatiin 122 kN.

Lumikuorma lasketaan kohdan 2.3 mukaan. Lumikuorman s_k ominaisarvo maan pinnalla on $2,5 \text{ kN/m}^2$ ja lumikuorman s ominaisarvo katolla on $2,0 \text{ kN/m}^2$ (tuulensuojaisuuskerroin $C_e = 1,0$, muotokerroin $\mu_i = 0,8$, lämpökerroin $C_{ti} = 1,0$).

Hyötykuorman arvot saadaan kohdan 2.2 mukaan. Hyötykuorman q_k ominaisarvo luokan B mukaan on $0,3 \text{ kN/m}^2$. Hyötykuormassa on huomioitu siirrettävien välinien paino $0,5 \text{ kN/m}^2$.

Lisävaakavoima lasketaan kohdassa 2.2.3 esitetyillä kaavoilla. Vinouden θ_0 perusarvo on $1/200$. Pienennyskerroimen α_h arvoksi saadaan $0,67$ ja pienennyskerroin α_m on $0,75$. Vinouden θ_i arvoksi saadaan siis $1/400$.

Yhdelle kerrokselle tulevat poikittaisvoimat vinoudesta (1.-3.krs)

$$H_{gk} = 4520,1 \cdot 1/400 = 11,3 \text{ kN/kerros}$$

$$H_{qk} = 1866,2 \cdot 1/400 = 4,7 \text{ kN/kerros}$$

Yhdelle kerrokselle tulevat poikittaisvoimat vinoudesta (4.krs)

$$H_{gk} = 4209,1 \cdot 1/400 = 10,5 \text{ kN/kerros}$$

$$H_{qk} = 1244,2 \cdot 1/400 = 3,1 \text{ kN/kerros}$$

Kokonaispoikittaisvoimat

$$H_{gk} = (3 \cdot 11,3) + 10,5 = 44,4 \text{ kN}$$

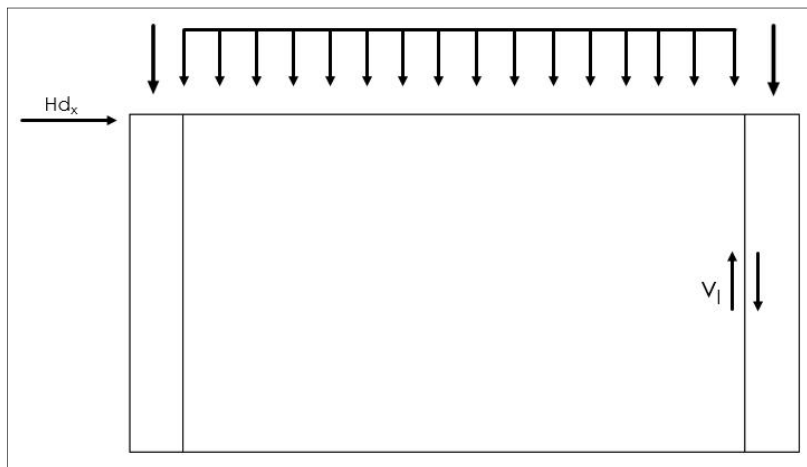
$$H_{qk} = (3 \cdot 4,7) + 3,1 = 17,1 \text{ kN}$$

$$H_{dx} = 1,15 \cdot 1,1 \cdot H_{gk} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot H_{qk} + 1,5 \cdot 1,1 \cdot F_{wk}$$

$$H_{dx} = 1,15 \cdot 1,1 \cdot 44,4 \text{ kN} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 17,1 \text{ kN} + 1,5 \cdot 1,1 \cdot 122 \text{ kN} = 276 \text{ kN}$$

Vaakakuorma jakaantuu tasan kahdelle seinälle: $276/2 = 138 \text{ kN}$

Alimman kerroksen seinän ja pilarin välisessä pystysaumassa vaikuttaa leikkausvoima $V_l = 10,2 \text{ kN/m}$, joka saadaan kaavasta 21.



Kuva 17. Seinän ja pilarin toiminta yhdessä

$$V_l = H_d * \frac{S}{I} \quad (21)$$

jossa H_d vaakavoima [kN]
 S elementin staattinen momentti [m³]
 I koko rakenteen hitausmomentti [m⁴]

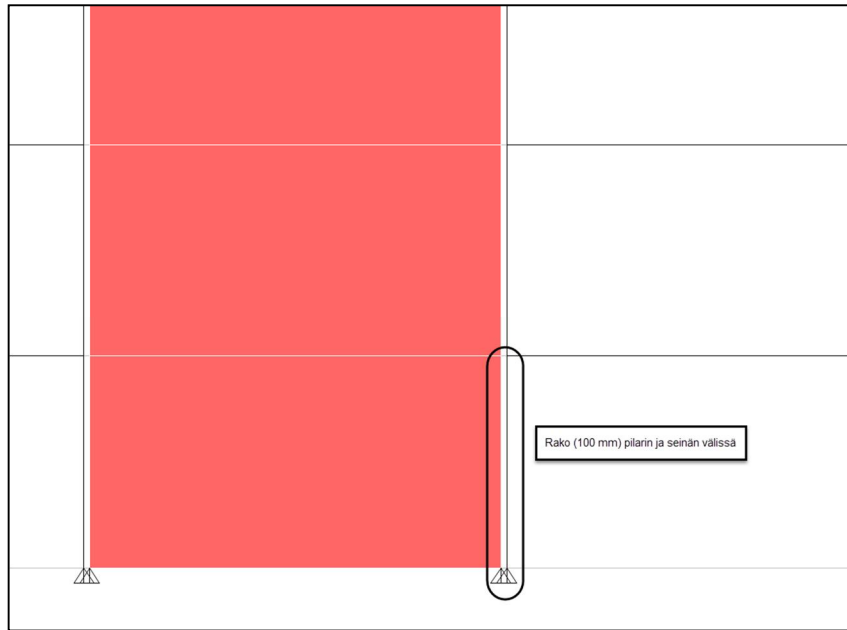
Alimman kerroksen pilarille moduulilla C/4 tuleva pystykuorma on laskettu taulukossa 11.

Taulukko 11. Pilarille tuleva pystykuorma

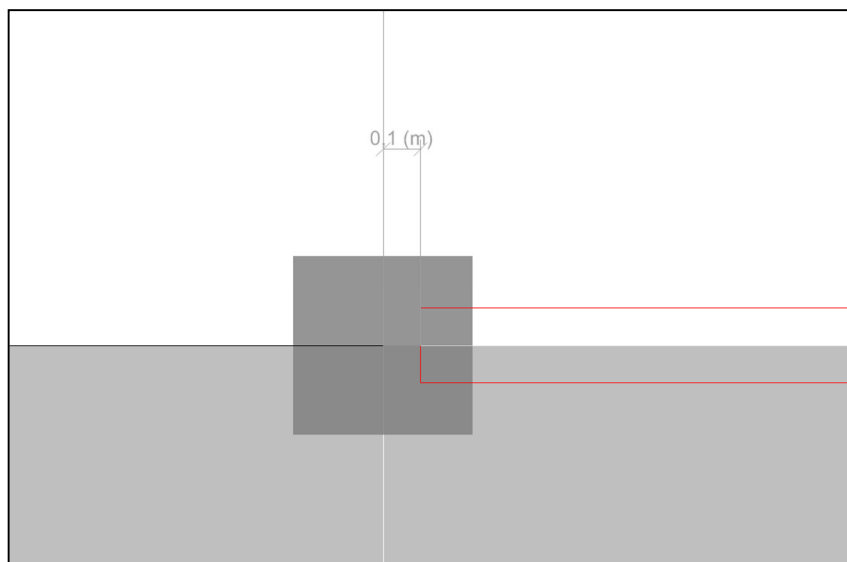
4.krs						
ontelot g_k	4,2 kN/m ² 13,0 m ²	54,2 kN				
pilari g_k	5,7 kN/m 3,6 m	20,4 kN				
palkki g_k	6,8 kN/m 3,6 m	24,7 kN				
		ΣP_g 99,3 kN	ΣP_g 99,3 kN			
lumikuorma q_k	2,0 kN/m ² 13,0 m ²	25,9 kN				
		ΣP_q 25,9 kN	ΣP_q 25,9 kN	ΣP_d 155,5 kN		
3.krs						
ontelot g_k	4,2 kN/m ² 13,0 m ²	54,2 kN				
pilari g_k	5,7 kN/m 3,6 m	20,4 kN				
palkki g_k	6,8 kN/m 3,6 m	24,7 kN				
tasoite g_k	0,5 kN/m ² 13,0 m ²	6,5 kN				
		ΣP_g 105,7 kN	ΣP_g 205,0 kN			
hyötykuorma q_k	3,0 kN/m ² 13,0 m ²	38,9 kN				
		ΣP_q 38,9 kN	ΣP_q 64,8 kN	ΣP_d 353,4 kN		
2.krs						
ontelot g_k	4,2 kN/m ² 13,0 m ²	54,2 kN				
pilari g_k	5,7 kN/m 3,6 m	20,4 kN				
palkki g_k	6,8 kN/m 3,6 m	24,7 kN				
tasoite g_k	0,5 kN/m ² 13,0 m ²	6,5 kN				
		ΣP_g 105,7 kN	ΣP_g 310,7 kN			
hyötykuorma q_k	3,0 kN/m ² 13,0 m ²	38,9 kN				
		ΣP_q 38,9 kN	ΣP_q 103,7 kN	ΣP_d 551,3 kN		
1.krs						
ontelot g_k	4,2 kN/m ² 13,0 m ²	54,2 kN				
pilari g_k	5,7 kN/m 3,6 m	20,4 kN				
palkki g_k	6,8 kN/m 3,6 m	24,7 kN				
tasoite g_k	0,5 kN/m ² 13,0 m ²	6,5 kN				
		ΣP_g 105,7 kN	ΣP_g 416,5 kN			
hyötykuorma q_k	3,0 kN/m ² 13,0 m ²	38,9 kN				
		ΣP_q 38,9 kN	ΣP_q 142,6 kN	ΣP_d 749,2 kN		

5.3 FEM-laskenta 2

Toiseen laskentamalliin pilarin ja seinän välinen liitos mallinnettiin niin, että pilarin ja seinän väliin jätettiin 100 millimetrin rako (kuvat 18 ja 19). Tämä tarkoittaa sitä, että materiaalia puuttuu pilarin ja seinän väliltä ja tällöin esimerkiksi vertikaalivoimat eivät jakaudu liitoksessa pilarilta seinälle.

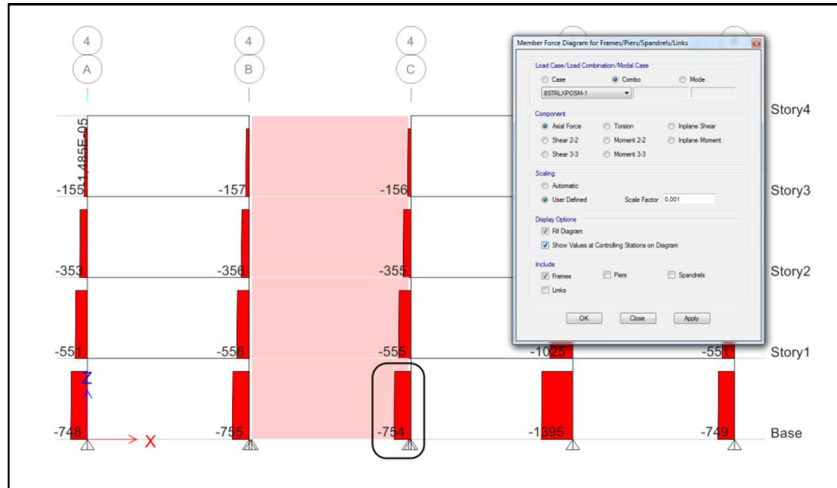


Kuva 18. Rako seinän ja pilarin välissä

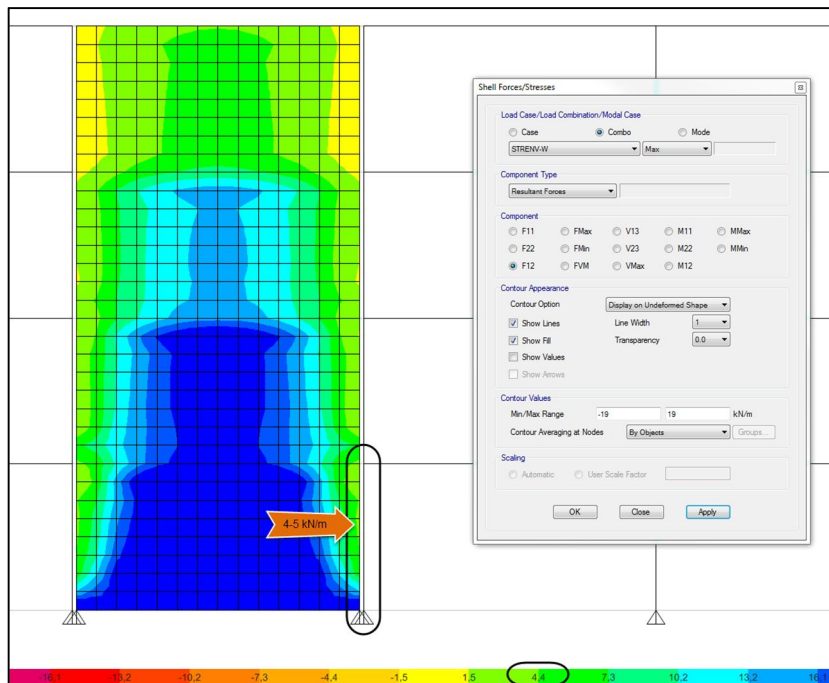


Kuva 19. Seinän ja pilarin välinen rako

Kuvassa 20 on esitetty pilarin normaalivoimarasituskuva. Kuvasta saadaan pilarille tulevan kuorman arvoksi 754 kN. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima on keskimääräisesti 4-5 kN/m (kuva 21).



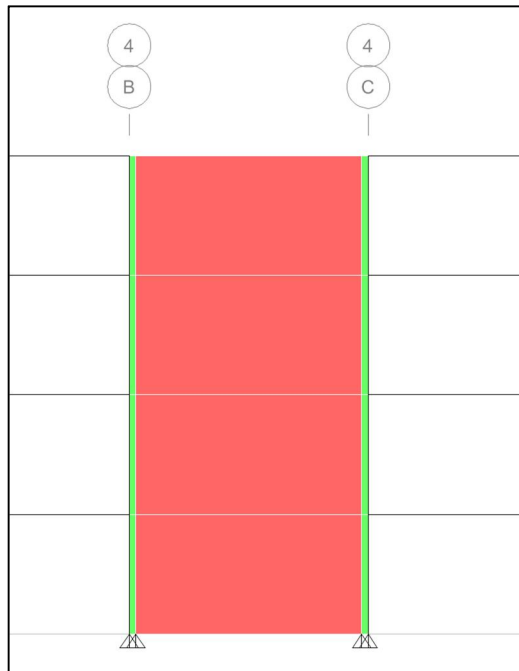
Kuva 20. Pilarin normaalivoima



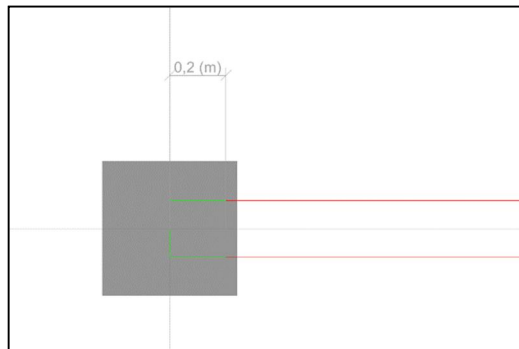
Kuva 21. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima

5.4 FEM-laskenta 3

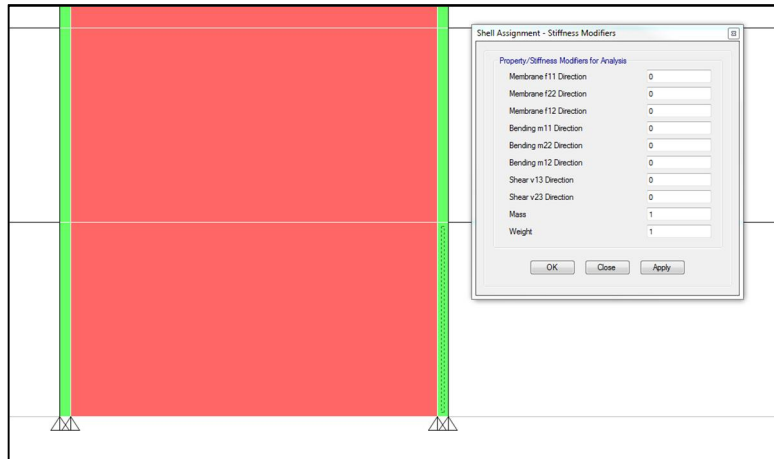
Kolmas mallinnus toteutettiin niin, että seinän ja pilarin väliin lisättiin erillinen 200 millimetrin mittainen seinä (kuvat 22 ja 23). Lisätyn seinän paino määritettiin nol-laksi, jotta se ei tuo lisäkuormaa ja tulokset pysyvät vertailukelpoisina. Sen lisäksi tämän erillisen seinäpalan jäykkyysominaisuuksia muokattiin kuvan 234 mukai-sesti niin, että seinällä ei käytännössä ole minkäänlaista jäykkyyttä ja näin ollen se ei ota vastaan mitään kuormia.



Kuva 22. Sivunäkymä linjalta 4

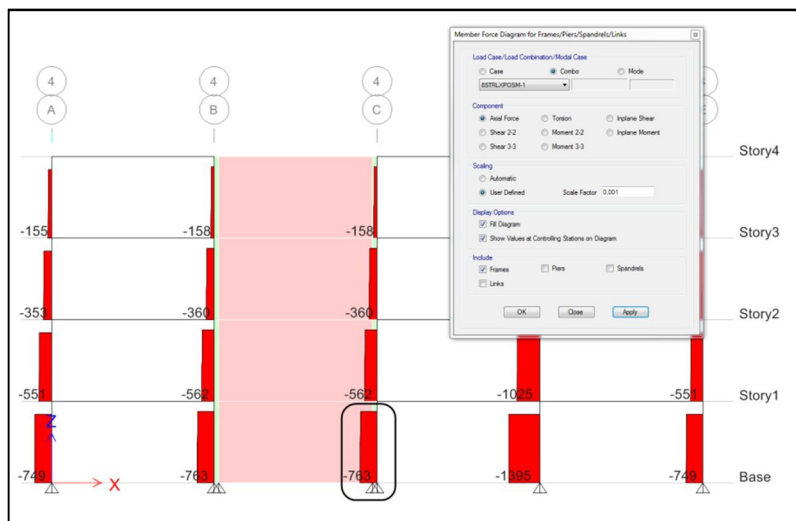


Kuva 23. Seinän ja pilarin liitos

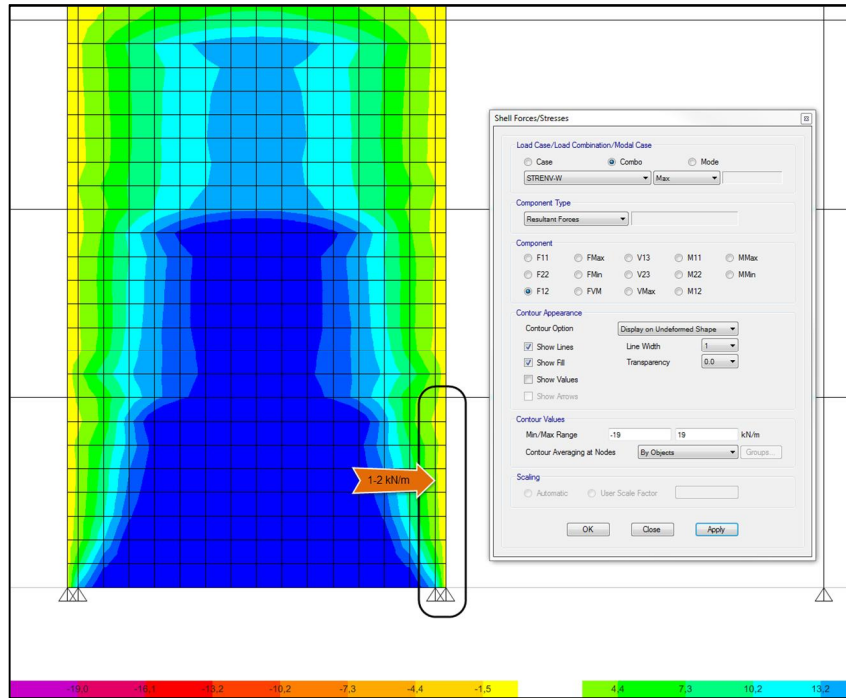


Kuva 24. Seinän jäykkyyssominaisuuksien muokkaaminen

Kuvasta 25 saadaan taas pilarille tuleva kuorma, joka on 763 kN. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima on lähes olematon (kuva 26).



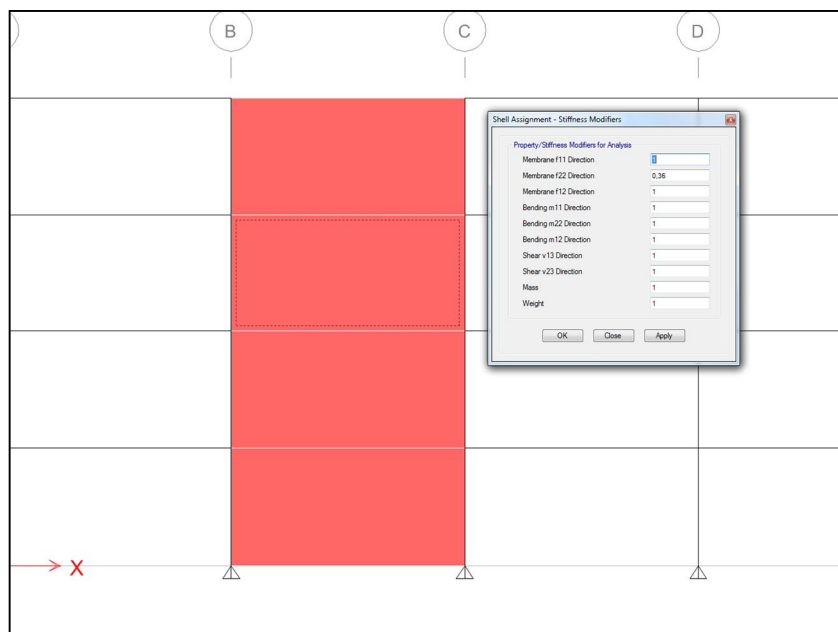
Kuva 25. Pilarin normaalivoima



Kuva 26. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima

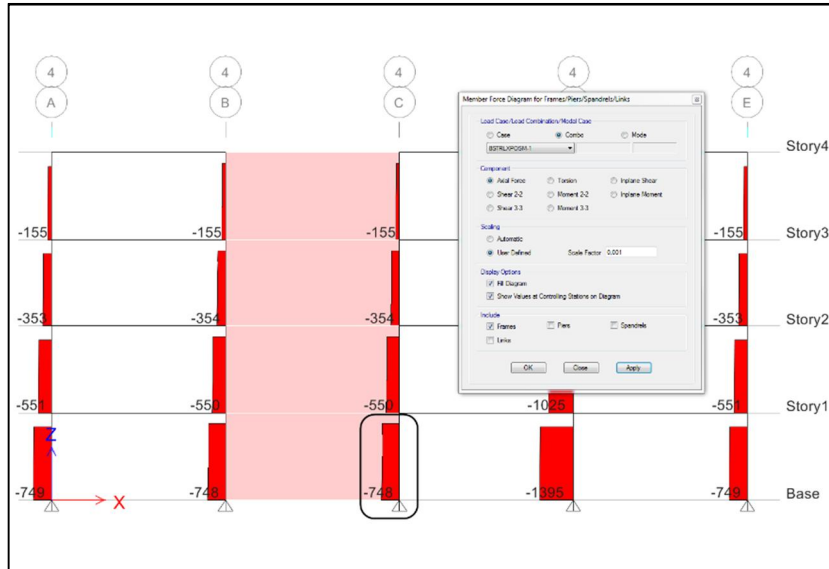
5.5 FEM-laskenta 4

Neljännessä laskentamallissa seinän ja pilarin välinen liitos on samanlainen kuin ensimmäisessä (kuva 12 s. 27). Tässä mallissa muokattiin koko seinän jäykkysominaisuuksia pystykuorman suunnassa (kuva 27).

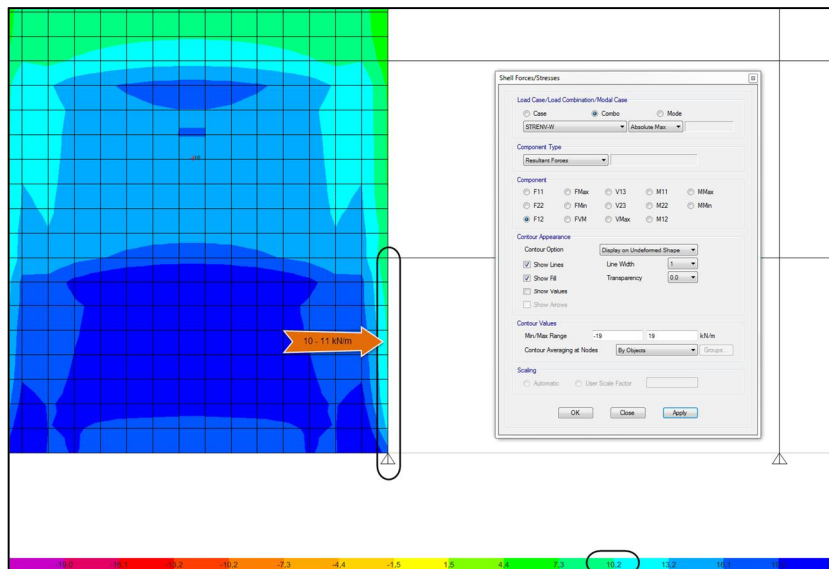


Kuva 27. Seinän jäykkysominaisuuksien muokkaaminen

Pilarin normaalivoimarasituskuvasta saadaan pilarille tulevan kuorman arvoksi 748 kN (kuva 28). Keskimääräinen leikkausvoima pystysaumassa on 10-11 kN/m (kuva 29).



Kuva 28. Pilarin normaalivoima



Kuva 29. Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima

6 YHTEENVETO

Rakenteiden suunnittelussa käytettävät pilari-seinä-liitoksen mallinnustavat antavat helposti joissakin kohdissa vääriä tuloksia. Siitä syystä suunnittelutehtävissä on tehtävä päällekkäistä laskentaa eri menetelmillä. Opinnäytetyön esimerkkikohteessa FEM-laskennasta saatu pilarin normaalivoiman arvo ei vastaa käsin laskemalla saatua oikeaa arvoa, joka on 749 kN. FEM-malli antaa tuloksen 412 kN kun seinä mallinnetaan koko leveydeltään pilariin liittyväksi. Luvussa 5 esitetystä kuvaotteesta voidaan nähdä, että osa pilarille tulevasta kuormasta siirtyy seinälle, mitä ei todellisuudessa voi tapahtua. Sen sijaan pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima vastaa käsinlaskennasta saatua arvoa eli esimerkkilaskuissa molemmilla menetelmillä saatiin tulokseksi 10,2 kN/m.

Toisessa tarkastelussa tehtiin FEM-laskenta, jossa seinän ja pilarin väliin jätettiin 100 millimetrin rako. Siinä pilarin normaalivoimaksi saatiin muutaman prosentin tarkkuudella sama tulos kuin käsinlaskennassa (754 kN). FEM-laskennasta saatu arvo on hieman suurempi, koska osa raon päällä olevalta laatastolta tulevasta kuormasta siirtyy nyt myös pilarille eikä pelkästään seinälle. Tämä mallinnustapa taas antaa pystysauman leikkausvoimaksi virheellisen tuloksen 4–5 kN/m.

Kolmas tarkastelu, jossa seinän ja pilarin väliin lisättiin hoikka seinä, antaa samankaltaisia tuloksia kuin edellä esitetty toinen FEM-laskenta. Tässäkin pilarin normaalivoima 763 kN on suurempi kuin käsinlaskennasta saatu tulos. Suurempi arvo selittyy tässäkin sillä, että lisätty erillinen seinäpalikka, jolla ei ole lainkaan jäykkyyttä, ei ota vastaan laatastolta tulevia kuormia vaan osa kuormista siirtyy pilarille ja osa seinälle. FEM-laskennasta saatu pystysauman leikkausvoima oli tässä tapauksessa 1-2 kN/m eli noin 80–90% pienempi kuin todellinen arvo.

Neljäs FEM-laskenta, jossa seinän ominaisuuksia pystykuorman suunnassa muokattiin, antaa lähes samoja tuloksia kuin käsinlaskenta. Pilarin normaalivoiman arvo on nyt käytännössä sama (748 kN). Pystysaumassa vaikuttava leikkausvoima on FEM-laskennassa keskimäärin samaa luokkaa kuin käsinlaskennassa (10–11 kN/m). Seinän jäykkyysominaisuuksien muokkaamisen vaikutusta

kaikkiin suunnittelussa tarvittaviin voimasuureisiin ei tarkasteltu, joten tuloksen luotettavuus voidaan toistaiseksi kyseenalaistaa.

Lopputuloksena voidaan todeta, että nykyistä mallinnustapaa ei kannata muuttaa sen yksinkertaisuuden ja nopeuden takia. Vaikka tarkasteltu neljäs laskentamalli antoikin oikeita tuloksia, seinän jäykkyyden muokkaaminen ei ole jatkossa varteenotettava vaihtoehto.

Toisaalta voidaan yleisesti todeta että, ei ole ohjelman, tässä tapauksessa ETABS:in, käyttäjän tehtävä pyrkiä löytämään erilaisia mallinnustapoja, joilla saadaan eri tilanteissa oikeita lopputuloksia. Olisi järkevää että laajan ja kehittyneen ohjelmiston tekijä kehittäisi ohjelmaa niin että se soveltuu hyvin käyttäjien erilaisiin tarpeisiin.

LÄHTEET

1. RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
2. SFS-EN 1991-1-1. 2002. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
3. Ympäristöministeriö. 2016. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden kuormat. Eurokoodien SFS-EN 1991 kansalliset liitteet. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus [viitattu 25.4.2017].
4. SFS-EN 1991-1-3. 2004. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
5. SFS-EN 1991-1-4. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
6. SFS-EN 1992-1-1. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
7. Ympäristöministeriö. 2016. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Kanta-vien rakenteiden suunnitteluperusteet. Eurokoodin SFS-EN 1990 kansallinen liite. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus [viitattu 27.4.2017].
8. Betoniteollisuus ry. 2010. Jäykistysjärjestelmät. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat> [viitattu 10.5.2017].
9. Elementtisuunnittelu.fi. Porrashuoneiden sijoitus. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/portaat/porrashuoneiden-sijoitus> [viitattu 10.5.2017].
10. Computers and Structures, Inc. 2016. Welcome to ETABS. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://docs.csiamerica.com/manuals/etabs/Welcome%20to%20ETABS.pdf> [viitattu 15.5.2017].

11. Elementtimenetelmän perusteet. Johdanto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5G0jJ/FES01.pdf> [viitattu 15.5.2017].
12. Computers and Structures, Inc. 2016. Welcome to ETABS. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://docs.csiamerica.com/manuals/etabs/Welcome%20to%20ETABS.pdf> [viitattu 15.5.2017].

Loads

7.5.2017

EUROCODE1 2005 Auto Wind Load Calculation

This calculation presents the automatically generated lateral wind loads for load pattern WINDX according to EUROCODE1 2005, as calculated by ETABS.

Exposure Parameters

Exposure From = Diaphragms

Terrain Category = III

Wind Direction = 0 degrees

Basic Wind Velocity, V_b [EC 4.2(2)]

$$V_b = 21 \frac{\text{meter}}{\text{sec}}$$

Windward Coefficient, $C_{p,wind}$

$$C_{p,wind} = 0,73333$$

Leeward Coefficient, $C_{p,lee}$

$$C_{p,lee} = 0,3$$

Air Density, ρ

$$\rho = 1,25$$

Top Story = Story4

Bottom Story = Base

Include Parapet = No

Factors and CoefficientsStructural Factor, c_s [EC 6.2(1)]

$$c_s, c_d = 1$$

Elevation, z_o

$$z_o = 0,3$$

Minimum Elevation, z_{min}

$$z_{min} = 5$$

Maximum Elevation, z_{max}

$$z_{max} = 200$$

Turbulence Factor, k_t [EC 4.4(1)]

$$k_t = 1$$

Orography Factor, c_o [EC 4.3.3]

$$c_o = 1$$

Turbulence Intensity, I_z [EC 4.4(1)]

$$I_z = \frac{k_t}{c_o(z) \ln \left(\frac{z}{z_o} \right)} \text{ for } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$= I_z(z_{min}) \text{ for } z < z_{min}$$

Terrain Factor, k_z [EC 4.3.2(1) Eq. 4.5]

$$k_z = 0,19 \left(\frac{z_o}{0,05} \right)^{0,07} \quad k_z = 0,215389$$

Roughness Factor, $c_r(z)$ [EC 4.3.2(1) Eq. 4.4]

$$c_r(z) = k_z \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \text{ for } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$= c_r(z_{min}) \text{ for } z < z_{min}$$

Lateral LoadingPeak Velocity Pressure, $q_p(z)$ [EC 4.5(1) Eq. 4.8]

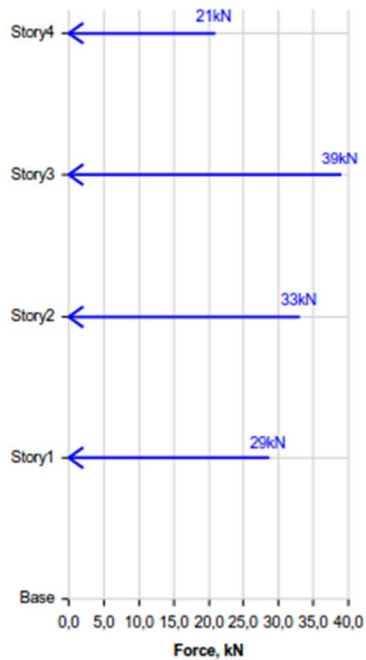
$$q_p(z) = [1 + 7 I_z(z)] \frac{1}{2} \rho [c_r(z) c_o(z) V_b]^2$$

Wind Pressure, w [EC 5.2(1) Eq. 5.1]



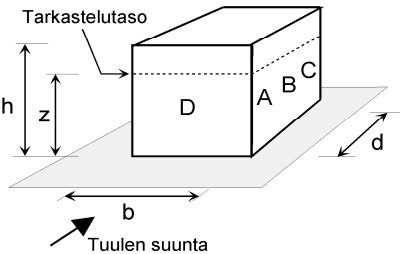
$$w = q_p(z) c_s c_d (c_{p,wind} + c_{p,lee})$$



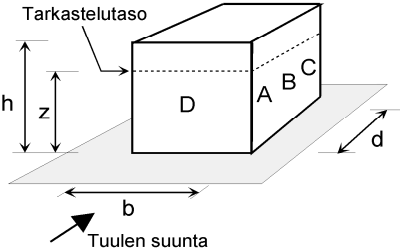
Loads



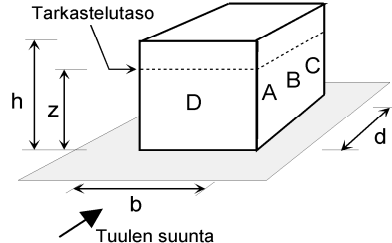
7.5.2017



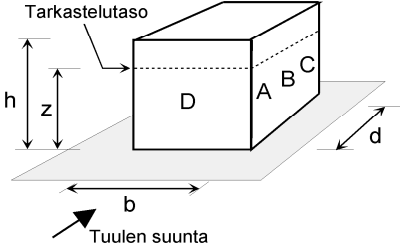
Applied Story Forces*Lateral Load to Stories - 0°*

Story	Elevation m	X-Dir kN	Y-Dir kN
Story4	14,4	21	0
Story3	10,8	39	0
Story2	7,2	33	0
Story1	3,6	29	0
Base	0	0	0

		Rakennelaskelma																																	
		Tekijä: HMAT	Sivu: 1(1)																																
Päiväys:																																			
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:	Sijainti:																																
Opinnäytetyö																																			
M10 Tuulikuorma Eurocode EN1991-1-4:n mukaan			Versio 1.5																																
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011																																			
<table border="0"> <tr> <td>Maastoluokka =</td> <td>3</td> <td>Rakennuksen mitat:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tuulen nopeuden perusarvo =</td> <td>21</td> <td>h =</td> <td>14,4 m</td> </tr> <tr> <td>Maaston kaltevuus Φ =</td> <td>0</td> <td>d =</td> <td>28,8 m</td> </tr> <tr> <td>Sijaintikerroin S =</td> <td>0</td> <td>b =</td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>Ilman tiheys ρ =</td> <td>1,25 kg/m³</td> <td>Sisäisen paineen kertoimet:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Korkeus maanpinnasta z =</td> <td>3,6 m</td> <td>Ylipaine C_{pi} =</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Alipaine C_{pi} =</td> <td>-0,30</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Pinta-ala A =</td> <td>10 m²</td> </tr> </table>				Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:		Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m	Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m	Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m	Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:		Korkeus maanpinnasta z =	3,6 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20			Alipaine C _{pi} =	-0,30			Pinta-ala A =	10 m ²
Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:																																	
Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m																																
Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m																																
Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m																																
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:																																	
Korkeus maanpinnasta z =	3,6 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20																																
		Alipaine C _{pi} =	-0,30																																
		Pinta-ala A =	10 m ²																																
<p>Puuskanopeuspaine:</p> <p>$q_p(z) = 353,0 \text{ N/m}^2$</p> <p>$q_p(h) = 538,1 \text{ N/m}^2$</p>																																			
																																			
<p>Kuormat seinässä:</p> <p>Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.</p>																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A:</td> <td>494,3 N/m²</td> <td></td> <td>4,32 m</td> </tr> <tr> <td>B:</td> <td>353,0 N/m²</td> <td></td> <td>17,28 m</td> </tr> <tr> <td>C:</td> <td>247,1 N/m²</td> <td></td> <td>7,2 m</td> </tr> <tr> <td>D:</td> <td>364,8 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>E:</td> <td>200,1 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	A:	494,3 N/m ²		4,32 m	B:	353,0 N/m ²		17,28 m	C:	247,1 N/m ²		7,2 m	D:	364,8 N/m ²		21,6 m	E:	200,1 N/m ²		21,6 m								
	Kuorma		Leveys																																
A:	494,3 N/m ²		4,32 m																																
B:	353,0 N/m ²		17,28 m																																
C:	247,1 N/m ²		7,2 m																																
D:	364,8 N/m ²		21,6 m																																
E:	200,1 N/m ²		21,6 m																																
<p>Kuormat tasakatolla:</p> <p>Positiivinen suunta on ylöspäin.</p>																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F:</td> <td>1076,3 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>G:</td> <td>753,4 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>H:</td> <td>484,3 N/m²</td> <td></td> <td>8,64 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>215,3 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>-269,1 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	F:	1076,3 N/m ²		2,16 m	G:	753,4 N/m ²		2,16 m	H:	484,3 N/m ²		8,64 m	I:	215,3 N/m ²		18 m	I:	-269,1 N/m ²		18 m								
	Kuorma		Leveys																																
F:	1076,3 N/m ²		2,16 m																																
G:	753,4 N/m ²		2,16 m																																
H:	484,3 N/m ²		8,64 m																																
I:	215,3 N/m ²		18 m																																
I:	-269,1 N/m ²		18 m																																

		Rakennelaskelma																																	
		Tekijä: HMAT	Sivu: 1(1)																																
Päiväys:																																			
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:	Sijainti:																																
Opinnäytetyö																																			
M10 Tuulikuorma Eurocode EN1991-1-4:n mukaan			Versio 1.5																																
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011																																			
<table border="0"> <tr> <td>Maastoluokka =</td> <td>3</td> <td>Rakennuksen mitat:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tuulen nopeuden perusarvo =</td> <td>21</td> <td>h =</td> <td>14,4 m</td> </tr> <tr> <td>Maaston kaltevuus Φ =</td> <td>0</td> <td>d =</td> <td>28,8 m</td> </tr> <tr> <td>Sijaintikerroin S =</td> <td>0</td> <td>b =</td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>Ilman tiheys ρ =</td> <td>1,25 kg/m³</td> <td>Sisäisen paineen kertoimet:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Korkeus maanpinnasta z =</td> <td>7,2 m</td> <td>Ylipaine C_{pi} =</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Alipaine C_{pi} =</td> <td>-0,30</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Pinta-ala A =</td> <td>10 m²</td> </tr> </table>				Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:		Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m	Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m	Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m	Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:		Korkeus maanpinnasta z =	7,2 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20			Alipaine C _{pi} =	-0,30			Pinta-ala A =	10 m ²
Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:																																	
Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m																																
Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m																																
Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m																																
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:																																	
Korkeus maanpinnasta z =	7,2 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20																																
		Alipaine C _{pi} =	-0,30																																
		Pinta-ala A =	10 m ²																																
Puuskanopeuspaine: $q_p(z) = 413,6 \text{ N/m}^2$ $q_p(h) = 538,1 \text{ N/m}^2$																																			
Kuormat seinässä: Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A:</td> <td>579,1 N/m²</td> <td></td> <td>4,32 m</td> </tr> <tr> <td>B:</td> <td>413,6 N/m²</td> <td></td> <td>17,28 m</td> </tr> <tr> <td>C:</td> <td>289,5 N/m²</td> <td></td> <td>7,2 m</td> </tr> <tr> <td>D:</td> <td>427,4 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>E:</td> <td>234,4 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	A:	579,1 N/m ²		4,32 m	B:	413,6 N/m ²		17,28 m	C:	289,5 N/m ²		7,2 m	D:	427,4 N/m ²		21,6 m	E:	234,4 N/m ²		21,6 m								
	Kuorma		Leveys																																
A:	579,1 N/m ²		4,32 m																																
B:	413,6 N/m ²		17,28 m																																
C:	289,5 N/m ²		7,2 m																																
D:	427,4 N/m ²		21,6 m																																
E:	234,4 N/m ²		21,6 m																																
Kuormat tasakatolla: Positiivinen suunta on ylöspäin.																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F:</td> <td>1076,3 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>G:</td> <td>753,4 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>H:</td> <td>484,3 N/m²</td> <td></td> <td>8,64 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>215,3 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>-269,1 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	F:	1076,3 N/m ²		2,16 m	G:	753,4 N/m ²		2,16 m	H:	484,3 N/m ²		8,64 m	I:	215,3 N/m ²		18 m	I:	-269,1 N/m ²		18 m								
	Kuorma		Leveys																																
F:	1076,3 N/m ²		2,16 m																																
G:	753,4 N/m ²		2,16 m																																
H:	484,3 N/m ²		8,64 m																																
I:	215,3 N/m ²		18 m																																
I:	-269,1 N/m ²		18 m																																

		Rakennelaskelma																																	
		Tekijä: HMAT	Sivu: 1(1)																																
Päiväys:																																			
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:	Sijainti:																																
Opinnäytetyö																																			
M10 Tuulikuorma Eurocode EN1991-1-4:n mukaan			Versio 1.5																																
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011																																			
<table border="0"> <tr> <td>Maastoluokka =</td> <td>3</td> <td>Rakennuksen mitat:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tuulen nopeuden perusarvo =</td> <td>21</td> <td>h =</td> <td>14,4 m</td> </tr> <tr> <td>Maaston kaltevuus Φ =</td> <td>0</td> <td>d =</td> <td>28,8 m</td> </tr> <tr> <td>Sijaintikerroin S =</td> <td>0</td> <td>b =</td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>Ilman tiheys ρ =</td> <td>1,25 kg/m³</td> <td>Sisäisen paineen kertoimet:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Korkeus maanpinnasta z =</td> <td>10,8 m</td> <td>Ylipaine C_{pi} =</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Alipaine C_{pi} =</td> <td>-0,30</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Pinta-ala A =</td> <td>10 m²</td> </tr> </table>				Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:		Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m	Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m	Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m	Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:		Korkeus maanpinnasta z =	10,8 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20			Alipaine C _{pi} =	-0,30			Pinta-ala A =	10 m ²
Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:																																	
Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m																																
Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m																																
Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m																																
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:																																	
Korkeus maanpinnasta z =	10,8 m	Ylipaine C _{pi} =	0,20																																
		Alipaine C _{pi} =	-0,30																																
		Pinta-ala A =	10 m ²																																
<p>Puuskanopeuspaine:</p> <p>$q_p(z) = 485,0 \text{ N/m}^2$</p> <p>$q_p(h) = 538,1 \text{ N/m}^2$</p>																																			
																																			
<p>Kuormat seinässä:</p> <p>Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.</p>																																			
<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Kuorma</td> <td></td> <td>Leveys</td> </tr> <tr> <td>A:</td> <td>678,9 N/m²</td> <td></td> <td>4,32 m</td> </tr> <tr> <td>B:</td> <td>485,0 N/m²</td> <td></td> <td>17,28 m</td> </tr> <tr> <td>C:</td> <td>339,5 N/m²</td> <td></td> <td>7,2 m</td> </tr> <tr> <td>D:</td> <td>501,1 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>E:</td> <td>274,8 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> </table>					Kuorma		Leveys	A:	678,9 N/m ²		4,32 m	B:	485,0 N/m ²		17,28 m	C:	339,5 N/m ²		7,2 m	D:	501,1 N/m ²		21,6 m	E:	274,8 N/m ²		21,6 m								
	Kuorma		Leveys																																
A:	678,9 N/m ²		4,32 m																																
B:	485,0 N/m ²		17,28 m																																
C:	339,5 N/m ²		7,2 m																																
D:	501,1 N/m ²		21,6 m																																
E:	274,8 N/m ²		21,6 m																																
<p>Kuormat tasakatolla:</p> <p>Positiivinen suunta on ylöspäin.</p>																																			
<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Kuorma</td> <td></td> <td>Leveys</td> </tr> <tr> <td>F:</td> <td>1076,3 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>G:</td> <td>753,4 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>H:</td> <td>484,3 N/m²</td> <td></td> <td>8,64 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>215,3 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>-269,1 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> </table>					Kuorma		Leveys	F:	1076,3 N/m ²		2,16 m	G:	753,4 N/m ²		2,16 m	H:	484,3 N/m ²		8,64 m	I:	215,3 N/m ²		18 m	I:	-269,1 N/m ²		18 m								
	Kuorma		Leveys																																
F:	1076,3 N/m ²		2,16 m																																
G:	753,4 N/m ²		2,16 m																																
H:	484,3 N/m ²		8,64 m																																
I:	215,3 N/m ²		18 m																																
I:	-269,1 N/m ²		18 m																																

		Rakennelaskelma																																	
		Tekijä: HMAT	Sivu: 1(1)																																
Päiväys:																																			
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:	Sijainti:																																
Opinnäytetyö																																			
M10 Tuulikuorma Eurocode EN1991-1-4:n mukaan			Versio 1.5																																
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011																																			
<table border="0"> <tr> <td>Maastoluokka =</td> <td>3</td> <td>Rakennuksen mitat:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tuulen nopeuden perusarvo =</td> <td>21</td> <td>h =</td> <td>14,4 m</td> </tr> <tr> <td>Maaston kaltevuus Φ =</td> <td>0</td> <td>d =</td> <td>28,8 m</td> </tr> <tr> <td>Sijaintikerroin S =</td> <td>0</td> <td>b =</td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>Ilman tiheys ρ =</td> <td>1,25 kg/m³</td> <td>Sisäisen paineen kertoimet:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Korkeus maanpinnasta z =</td> <td>14,4 m</td> <td>Ylipaine Cpi =</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Alipaine Cpe =</td> <td>-0,30</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Pinta-ala A =</td> <td>10 m²</td> </tr> </table>				Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:		Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m	Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m	Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m	Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:		Korkeus maanpinnasta z =	14,4 m	Ylipaine Cpi =	0,20			Alipaine Cpe =	-0,30			Pinta-ala A =	10 m ²
Maastoluokka =	3	Rakennuksen mitat:																																	
Tuulen nopeuden perusarvo =	21	h =	14,4 m																																
Maaston kaltevuus Φ =	0	d =	28,8 m																																
Sijaintikerroin S =	0	b =	21,6 m																																
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³	Sisäisen paineen kertoimet:																																	
Korkeus maanpinnasta z =	14,4 m	Ylipaine Cpi =	0,20																																
		Alipaine Cpe =	-0,30																																
		Pinta-ala A =	10 m ²																																
<p>Puuskanopeuspaine:</p> <p>$q_p(z) = 538,1 \text{ N/m}^2$</p> <p>$q_p(h) = 538,1 \text{ N/m}^2$</p>																																			
																																			
<p>Kuormat seinässä:</p> <p>Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.</p>																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A:</td> <td>753,4 N/m²</td> <td></td> <td>4,32 m</td> </tr> <tr> <td>B:</td> <td>538,1 N/m²</td> <td></td> <td>17,28 m</td> </tr> <tr> <td>C:</td> <td>376,7 N/m²</td> <td></td> <td>7,2 m</td> </tr> <tr> <td>D:</td> <td>556,1 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> <tr> <td>E:</td> <td>304,9 N/m²</td> <td></td> <td>21,6 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	A:	753,4 N/m ²		4,32 m	B:	538,1 N/m ²		17,28 m	C:	376,7 N/m ²		7,2 m	D:	556,1 N/m ²		21,6 m	E:	304,9 N/m ²		21,6 m								
	Kuorma		Leveys																																
A:	753,4 N/m ²		4,32 m																																
B:	538,1 N/m ²		17,28 m																																
C:	376,7 N/m ²		7,2 m																																
D:	556,1 N/m ²		21,6 m																																
E:	304,9 N/m ²		21,6 m																																
<p>Kuormat tasakatolla:</p> <p>Positiivinen suunta on ylöspäin.</p>																																			
<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kuorma</th> <th></th> <th>Leveys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F:</td> <td>1076,3 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>G:</td> <td>753,4 N/m²</td> <td></td> <td>2,16 m</td> </tr> <tr> <td>H:</td> <td>484,3 N/m²</td> <td></td> <td>8,64 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>215,3 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> <tr> <td>I:</td> <td>-269,1 N/m²</td> <td></td> <td>18 m</td> </tr> </tbody> </table>					Kuorma		Leveys	F:	1076,3 N/m ²		2,16 m	G:	753,4 N/m ²		2,16 m	H:	484,3 N/m ²		8,64 m	I:	215,3 N/m ²		18 m	I:	-269,1 N/m ²		18 m								
	Kuorma		Leveys																																
F:	1076,3 N/m ²		2,16 m																																
G:	753,4 N/m ²		2,16 m																																
H:	484,3 N/m ²		8,64 m																																
I:	215,3 N/m ²		18 m																																
I:	-269,1 N/m ²		18 m																																